



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

OTTO STÅHLE  
LAIVAN SÄHKÖVERKON YLIAALTOJEN TARKASTELU NEPLAN-  
OHJELMISTON AVULLA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Seppo Val-  
kealahti  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-  
neuvoston kokouksessa 09.09.2015

## TIIVISTELMÄ

**OTTO STÄHLE:** Laivan sähköverkon yliaaltojen tarkastelu Neplan-ohjelmiston avulla

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 70 sivua, 16 liitesivua

Tammikuu 2016

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Sähköverkot ja -markkinat

Tarkastaja: professori Seppo Valkealahti

Avainsanat: Laivan sähköverkko, Harmoniset yliaallot, Kokonaissärökerroin, Neplan, Verkostolaskenta

Tässä työssä tarkasteltiin laivasähköverkon ja itsenäisen sähkövoimajärjestelmän erityispiirteitä. Tarkoituksena oli tarkastella Neplan-verkostolaskentaohjelmiston avulla yliaaltojen vaikutusta ja käyttäytymistä itsenäisessä sähköverkossa. Tarkasteltavana verkkona käytettiin erään öljynporauslautan 690 V sähkönjakelua ja sen päätaulun toista puoliskoa tietynlaisessa kuormitustilanteessa. Lisäksi työn tarkoituksena oli perehtyä Neplan-ohjelmiston käytettävyyteen ja sen ominaisuuksiin verkostolaskennan näkökulmasta. Yliaaltoihin liittyvä teoria selvitettiin myös hieman tarkemmin, jotta yrityksen työntekijät saivat paremman kuvan kyseisestä ilmiöstä.

Neplan-ohjelmisto osoittautui verkkojen mallinnuksen ja laskennan kannalta erittäin toimivaksi ja kattavaksi ohjelmaksi. Tarvittavat tulokset yliaalloista saatiin melko nopeasti tehtyä ja tulosten esittäminen oli vaivatonta. Ohjelmassa oli mahdollista tehdä laskentaa monesta eri aihealueesta, vaikka tässä työssä keskityttiin ainoastaan yliaaltojen laskemiseen. Ongelmia ohjelman käytössä muodostui lähinnä ohjelman asetusten asettamisessa ja eri laitteiden lähtötietojen syöttämisessä. Lisäksi ohjelman käyttö verkkojen piirustustyökaluna havaittiin olevan puutteellinen. Verkkomallien luominen ohjelmaan oli kuitenkin helppoa ja verkkojen muunneltavuus kesken laskelmien onnistui vaivattomasti.

Kokonaisjännite – ja kokonaisvirtasäröt olivat tarkasteltavassa verkossa melko suuret tasasuuntaajien takia, mutta verkkoon asennetut suodattimet suodattivat yliaallot tehokkaasti. Ohjelman avulla pystyi havaitsemaan selkeästi eron, kun suodattimet kytkettiin verkkoon. Ohjelman tulokset pitäisi saada kuitenkin todennettua mittauksilla, jotta niiden paikkansa pitävyydestä voidaan olla varmoja. Ohjelmassa valmiiden mallien luominen nopeuttaisi analyysin tekoa ja ohjelman piirrosmerkit olisi syytä asettaa yhteneväksi luokituslaitosten ja standardien kanssa. Myös ohjelman ohjeet pitäisi saada tarkemmiksi ja joidenkin lähtötietojen rajoittaminen laskentamoduulin mukaan nopeuttaisi työskentelyä.

## ABSTRACT

**OTTO STÅHLE:** Harmonics analysis of ship network using Neplan software  
Tampere University of Technology  
Master of Science Thesis, 70 pages, 16 Appendix pages  
January 2016  
Master's Degree Programme in Electrical Engineering  
Major: Power systems and markets  
Examiner: Professor Seppo Valkealahti

**Keywords:** Ship's electrical network, Harmonics, Total harmonic distortion, Neplan, Network calculation

Ship's electrical network and its characteristics were examined in this M. Sc. thesis. The aim was to examine network calculation and modelling software called Neplan and make harmonic analysis to example network using the software. Example network in this thesis was offshore oil-drilling rig and half of its 690 V main switchboard in one type of load situation. One aim was also to examine usability of the Neplan software and Neplan's characteristics when making network calculations. Theory of harmonics was also studied in more detail to help company's employees to get familiar with the phenomenon.

Neplan software was noticed to be very functional and comprehensive when making calculations and modelling. Results of harmonics were made very quickly and presentation of the results was easy. Software allows user to make the calculation on different types of topics even though this thesis focused on harmonics calculation. The most problematic issue during the modelling process occurred when the input data of different devices was entered and settings of the software were set. Also, software's drawing features were a bit challenging. Overall, creating the network model to the software is easy and the ability to update the existing model during the calculation is a very useful feature in the program.

Total amount of voltage and current harmonic distortion were quite high in the examined network because of the rectifiers. After the installation of harmonic filters the distortion results decreased significantly. These results were easy to notice also in the software. However, distortion results should be verified with measurements in order to prove them to be reliable. In the software creating the finished models could speed up the calculation process and the graphic symbols of the components should be identical with standards and classifications. Also the instructions and the help menu of the software should be more specific. Limiting the input data and some options according to the calculation module could speed up working.

## ALKUSANAT

Diplomityö on tehty Turussa insinööri- ja konsultointitoimisto Elomatic Oy:lle. Työn tarkoituksena on selvittää yliaaltoihin liittyvää teoriaa sekä suorittaa yliaaltolaskelmat uudella verkostolaskentaohjelmistolla. Tämän lisäksi tarkastellaan ohjelman käytettävyyttä verkostolaskennassa ja selvitetään yleisesti laivasähköverkon rakennetta ja toimintaa.

Työn tarkastajana on toiminut professori Seppo Valkealahti, jolle suuret kiitokset työn ohjaamisesta ja tarkastamisesta. Elomatic Oy:n puolelta haluan kiittää työn ohjaajaa Veikko Pihlavaa, jonka ansiosta työhön liittyvä materiaali saatiin hankittua ja tekniset yksityiskohdat selvitettyä. Haluan kiittää lisäksi yrityksen puolelta vielä Jari Åbergia ja Timo Luomaa, jotka huolehtivat työn aiheen valinnasta ja työn etenemisestä.

Turussa 14.12.2015

Otto Ståhle

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	LAIVAN SÄHKÖVERKKO .....	2
2.1	Luokituslaitokset .....	2
2.2	Sähköverkon rakenne ja sähkönjakelu .....	3
2.3	Sähköenergian tuotanto .....	5
2.3.1	Generaattorit.....	5
2.3.2	Akseligeneraattorit .....	8
2.4	Sähköenergian kulutus .....	10
2.4.1	Propulsiojärjestelmät.....	10
2.4.2	Oikosulkumoottori .....	12
2.4.3	Muuntaja .....	14
2.4.4	Taajuusmuuttaja .....	14
2.4.5	Muut laitteet .....	17
2.5	Tulevaisuuden ratkaisut.....	17
2.5.1	Hybridipropulsio ja DC järjestelmä .....	17
2.5.2	Akusto .....	19
2.5.3	Polttokennot .....	21
3.	YLIAALLOT .....	24
3.1	Harmoniset yliaallot .....	24
3.2	Jännite- ja virtasärö .....	27
3.3	Yliaaltojen lähteet .....	28
3.3.1	Suuntaajat.....	28
3.3.2	Muuntajat .....	30
3.3.3	Muut lähteet .....	31
3.4	Yliaaltojen haittavaikutukset.....	32
3.4.1	Muuntajat .....	32
3.4.2	Moottorit ja generaattorit .....	33
3.4.3	Suuntaajat ja kompensointilaitteet .....	34
3.4.4	Resonanssit.....	34
3.4.5	Muita haittoja .....	35
3.5	Yliaaltojen torjunta.....	36
3.5.1	Rakenteelliset keinot .....	36
3.5.2	Estokelapariot .....	38
3.5.3	Yliaaltosuodattimet .....	38
4.	NEPLAN OHJELMISTO .....	41
4.1	Laskentamoduulit .....	41
4.1.1	Tehonjakolaskenta .....	42
4.1.2	Vikavirtalaskenta .....	43
4.1.3	Yliaaltolaskenta.....	43

4.2	Ohjelman käyttö .....	44
5.	MALLIVERKKO .....	46
5.1	Sähkönjakelu ja -tuotanto.....	46
5.2	Verkon komponentit ja kulutus .....	48
6.	YLIAALTOJEN LASKENTA JA TULOKSET .....	50
6.1	Ohjelman asetukset .....	50
6.2	Verkko ilman yliaaltosuodattimia .....	55
6.3	Verkko yliaaltosuodattimilla .....	58
7.	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	60
7.1	Yliaaltoanalyysin tulokset .....	60
7.2	Ohjelman käytettävyys .....	61
7.3	Parannusehdotukset .....	63
8.	YHTEENVETO .....	64
	LÄHTEET .....	66
	LIITE 1: NEPLAN- OHJELMAN KÄYTTÖLIITTYMÄ .....	71
	LIITE 2: MALLIVERKON YKSIVIIVADIAGRAMMI.....	72
	LIITE 3: LAUTAN PÄÄTAULUN MS 1 KISKON BUS 1 YKSIVIIVADIAGRAMMI NEPLANISSA .....	73
	LIITE 4: SUODATTIMIEN KYTKENTÄKUVA .....	74
	LIITE 5: KOKONAISVIRTASÄRÖN TULOKSET ILMAN YLIAALTOSUODATTIMIA .....	75
	LIITE 6: KOKONAISJÄNNITESÄRÖN TULOKSET ILMAN YLIAALTOSUODATTIMIA .....	77
	LIITE 7: YLIAALTOANALYYSIN TULOKSET ILMAN YLIAALTOSUODATTIMIA VERKKOMALLINÄKYMÄSSÄ .....	79
	LIITE 8: W.M. HEATER- KOMPONENTIN JÄNNITTEEN KUVAAJA JA PALKKIKUVAAJA YLIAALLOISTA ILMAN YLIAALTOSUODATTIMIA .....	80
	LIITE 9: KOKONAISVIRTASÄRÖN TULOKSET YLIAALTOSUODATTIMILLA	81
	LIITE 10: KOKONAISJÄNNITESÄRÖN TULOKSET YLIAALTOSUODATTIMILLA .....	83
	LIITE 11: YLIAALTOANALYYSIN TULOKSET YLIAALTOSUODATTIMILLA VERKKOMALLINÄKYMÄSSÄ .....	85
	LIITE 12: W.M. HEATER- KOMPONENTIN JÄNNITTEEN KUVAAJA JA PALKKIKUVAAJA YLIAALLOISTA YLIAALTOSUODATTIMILLA .....	86

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

ABS	Amerikkalainen luokituslaitos, engl. American Bureau of Shipping
AC	Vaihtovirta, engl. Alternating Current
AVR	Automaattinen jännitteensäätäjä, engl. Automatic Voltage Regulator
Azipod	ABB:n sähköinen ruoripotkurilaitteisto, engl. Azimuthing Podded Drive
CSI	Virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja, engl. Current Source Inverter
DC	Tasavirta, engl. Direct Current
DNV	Norjalainen riippumaton säätiö, jonka tarkoituksena on turvata ihmishenkiä, ympäristöä ja omaisuutta, norj. Det Norske Veritas
ICLL	Kansainvälinen yleissopimus aluksien kulkusyvyyksistä ja niiden merkitsemisestä, engl. International Convention on Load Lines
IMO	Kansainvälinen merenkulkuun erikoistunut järjestö, engl. International Maritime Organization
ISM-koodi	Kansainvälinen turvallisuusjohtamissäännöstö, engl. International Safety Management
ISPS-koodi	Kansainvälinen turvallisuussäännöstö aluksilla ja satamissa, engl. International Ship and Port Facility Security Code
K-kerroin	Muuntajan kyky käsitellä yliaaltoja ja epälineaarista kuormitusta
LNG	Nesteytetty maakaasu, engl. Liquefied Natural Gas
MARPOL	Kansainvälinen yleissopimus aluksista aiheutuvan meren pilaantumisen ehkäisemisestä, engl. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
PTI-PTO	Teho sisään ja teho ulos- konsepti, engl. Power Take-In – Power Take Out
PWM	Pulssinleveysmodulaatio, engl. Pulse Width Modulation
SG	Akseligeneraattori, engl. Shaft Generator

SGD	Akseligeneraattorikäyttö, engl. Shaft Generator Drive
SOLAS	Kansainvälinen meriturvallisuutta käsittelevä sopimus, engl. International Convention for the Safety of Life at Sea
THD	Kokonaissärökerroin, engl. Total Harmonic Distortion
UPS	Katkeamaton sähkönsyöttöjärjestelmä, engl. Uninterruptible Power Supply
VSI	Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja, engl. Voltage Source Inverter

$f$	Taajuus
$f_i$	Epäharmoninen taajuus
$f_M$	Syötettävän koneen taajuus
$f_r$	Resonanssitaajuus
$f_l$	Syöttävän verkon taajuus
$I$	Virran tehollisarvo
$i$	Virran hetkellisarvo
$i_m$	Magnetointivirta
$I_n$	Yliaallon n. virta
$I_l$	Perustaajuinen virta
$n_s$	Synkroninen pyörimisnopeus
$n_t$	Todellinen pyörimisnopeus
$n$	Yliaallon järjestysluku
$p$	Pulssiluku
$p_n$	Napapariluku
$\varphi$	Magneettivuo
$Q_c$	Kondensaattorin loisteho



$s$	Epätahtikoneen jättämä
$S_k$	Verkon oikosulkuteho
$U$	Jännite

# 1. JOHDANTO

Laivasähköverkko on mielenkiintoinen sähkövoimajärjestelmä ja se eroaa maasähköverkosta monin tavoin, esimerkiksi itsenäisyytensä takia. Sähköntuotanto tapahtuu lähellä kulutusta ja sähköverkon pitää pystyä toimimaan itsenäisesti merellä riittävän pitkään. Jotta laivan sähköverkossa ei tapahtuisi ylimääräisiä häviöitä ja verkkoliikenteen häiriintymistä, verkossa kannattaa kiinnittää huomiota sähkön laatuun. Laivasähköverkossa erilaiset suuntaajat ja etenkin suuressa käytössä olevat taajuusmuuttajat tuottavat verkkoon sähkön laatua haittaavia yliaaltoja. Yliaaltojen haittapuolena on muun muassa niiden aiheuttama ylimääräinen lämpeneminen ja kuormitettavuuden pieneneminen. Yliaaltojen määrää voidaan kuitenkin vähentää sähköverkossa erilaisten suodattimien ja rakenteellisten keinojen kautta.

Tässä työssä tarkastellaan laivasähköverkkoa ja malliverkkona käytetään erään öljynporauslautan sähköverkkoa. Öljynporauslautan sähköverkko on pääpiirteissään samanlainen kuin laivasähköverkko. Verkossa esiintyvät kuormitukset ovat erilaisia, mutta myös lautassa sähkö tuotetaan lähellä kulutusta ja lautan pitää toimia useita vuorokausia merellä itsenäisesti. Yliaaltojen määrää ja vaikutusta verkossa tutkitaan Neplan- verkostolaskentaohjelmiston avulla, joka on yritykselle uusi ohjelmisto.

Neplan on hankittu yritykseen hiljattain ja sen käyttöaste on ollut erittäin pieni. Tämän työn tavoitteena on perehtyä pääosin ohjelman käytettävyyteen sekä yliaaltojen teoriaan. Yliaallot ilmiönä on yritykselle jossain määrin vieras asia ja tähän halutaan selvitystä. Tavoitteena on saada myös uusi ohjelma käyttöönotettua entistä paremmin, jotta sen avulla voitaisiin tehdä enemmän töitä ja mahdollisesti hylätä vanhempia ohjelmistoja. Tuloksena saadaan selville laskentaohjelmiston hyviä ja huonoja puolia sekä kuinka hyvin ohjelmisto soveltuu yrityksen käyttöön.

Kappaleissa 2 ja 3 käsitellään aiheeseen liittyvä teoria. Kappale 2 käsittelee laivasähköverkkoa yleisesti ja kappaleen lopussa on lyhyt katsaus laivasähköverkon tulevaisuuteen. Kappale 3 käsittelee yliaaltojen teoriaa yleisellä tasolla sekä laivasähköverkon näkökulmasta. Kappaleessa 4 käsitellään Neplan-ohjelmistoa ja sen ominaisuuksia. Kappaleessa 5 esitellään malliverkko, jonka jälkeen kappaleessa 6 tehdään yliaaltolaskelmat malliverkkoon, sekä tarkastellaan ohjelman asetuksia yliaaltoanalyysin kannalta. Laskennan tuloksena saadaan kokonaissäröprosentit verkon eri pisteissä ja komponenteissa ilman yliaaltosuodattimia ja yliaaltosuodattimien kanssa. Kappaleessa 7 on esitetty johtopäätökset yliaaltolaskelmien tuloksista ja ohjelman käytettävyydestä. Luvussa 8 on yhteenveto työn sisällöstä.

## 2. LAIVAN SÄHKÖVERKKO

Laivan sähköverkon toimivuus on välttämätöntä laivan toiminnalle sekä matkustajien ja henkilökunnan turvallisuudelle ja hyvinvoinnille. Laivasähköverkko eroaa maasähköverkosta esimerkiksi itsenäisyytensä perusteella ja sen pitää pystyä toimimaan itsenäisesti merellä riittävän pitkään. Energiantuotanto sijaitsee laivassa lähellä kulutusta ja johtopituudet ovat huomattavasti lyhyempiä kuin maasähköverkossa. Laivassa oikosulkuvirrat saattavat olla todella suuria ja niiden hallinta pitää pystyä hoitamaan turvallisesti. Laivasähköverkko muistuttaa maasähköverkkoa monilta osin esimerkiksi säteilätäiskäytön perusteella. Seuraavissa kappaleissa on käsitelty tarkemmin laivasähköverkon rakennetta sekä sähkön jakelua, tuotantoa ja kulutusta.[1]

### 2.1 Luokituslaitokset

Luokituslaitos on merenkulkualalla toimiva yksityinen laitos. Luokitus ilmaisee, miten hyvin laiva, alus tai meritekninen rakenne täyttää luokituslaitoksen asettamat vaatimukset. Luokituslaitoksen asiantuntijat määrittävät laivan luokituksen tarkastettuaan laivan ja hyväksyttyään laivan piirustukset. Luokitus antaa tietoa laivanvarustajille, laivankorjaajille, laivameklareille, rahtaajille, lippuvaltioiden viranomaisille, vakuutuslaitoksille ja rahoittajille laivan turvallisuudesta ja luotettavuudesta. Luokitus ilmaistaan luokalla, joka merkitään luokitustodistukseen ja rekisteriin.[5]

Luokituslaitoksen pääasiallinen tehtävä on suorittaa puolueettomia tarkastuksia ja tutkimuksia. Omistaja valitsee uuden laivan hankittuaan sille luokituslaitoksen, jonka tehtävä on suorittaa alukselle sen kulun kannalta pakolliset meriteknisten rakenteiden luokitukset sekä pakolliset sertifiointit. Jos on kyseessä uudisrakennus, luokituslaitos on mukana jo suunnitteluvaiheesta alkaen aina rakennuksen valmistumiseen asti sekä koko sen olemassaolon ajan. Rakentamisen aikaan voimassa olleet luokituslaitoksen vaatimukset pätevät yleensä sen koko olemassaolon ajan. Luokituslaitokset tekevät myös tutkimustyötä sääntöjen kehittämiseksi. Kansainvälisten sopimusten edellyttämät tarkastukset tekee myös luokituslaitos.

Merenkulussa tärkeimpiä ovat IMO:n (engl. International Maritime Organization) yleissopimukset ja säännökset, joita ovat SOLAS (engl. International Convention for the Safety of Life at Sea), MARPOL (engl. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships), ICLL (engl. International Convention on Load Lines), ISM-koodi (engl. International Safety Management) sekä ISPS-koodi (engl. International Ship and Port Facility Security Code). Näiden vaatimukset on täyttyttävä, jotta kauppa-merenkulkua voidaan käydä. Luokituslaitokset tarjoavat myös erilaisia koulutus- ja

konsultointipalveluita. Eräitä luokituslaitoksia ovat *Lloyd's Register*, *Bureau Veritas*, *Det Norske Veritas* (DNV) ja *American Bureau of Shipping* (ABS).[6]

## 2.2 Sähköverkon rakenne ja sähkönjakelu

Nykyaikaisten laivojen sähköverkko on monimutkainen ja teknisesti haastava itsenäinen kokonaisuus. Laivojen sähköjärjestelmät perustuvat vaihtosähköön, jonka taajuus on joko 50 Hz tai 60 Hz. Korkeampi taajuus on käytössä Pohjois- Amerikassa, mutta myös sen ulkopuolella, kuten esimerkiksi mannertenvälisessä liikenteessä. Korkeampaa taajuutta voidaan päätyä käyttämään myös muissa aluksissa. Käytettäessä suurempaa taajuutta saavutetaan säästöjä esimerkiksi laitteiden dimensioissa. Taajuus määrittää vaihtovirtamoottoreiden ja – generaattoreiden pyörimisnopeudet. Taulukkoon 2.1 on koottu yleisesti käytössä olevat jännitteet kahdella eri taajuudella.[2]

**Taulukko 2.1.** Laivan eri jännitetasot 50 ja 60 Hz taajuuksilla.[2]

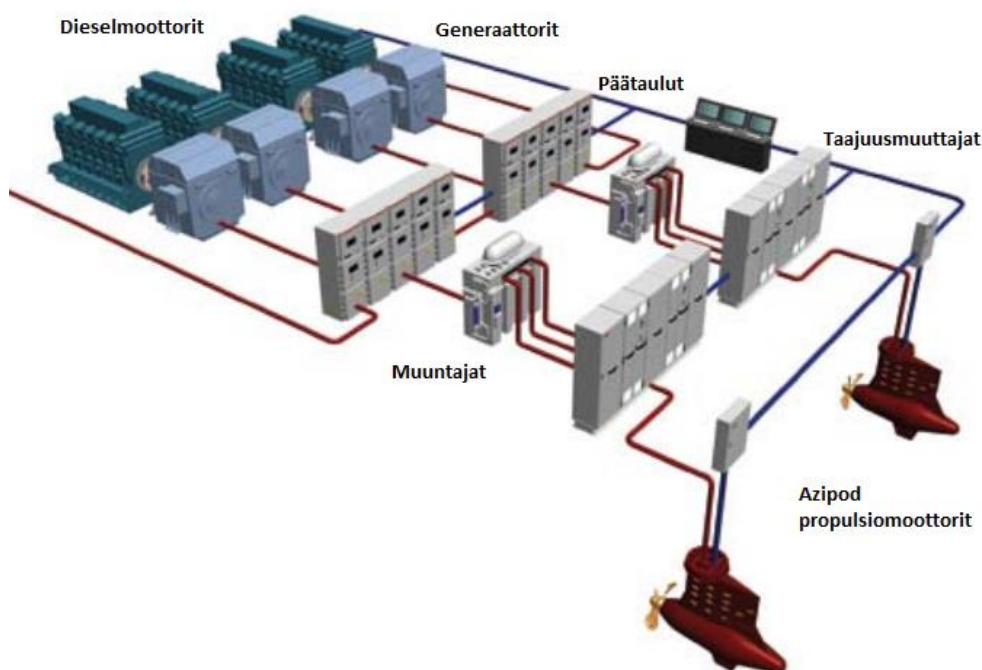
	Verkon taajuus $f$ (Hz)	
	50	60
<b>Jännitetaso <math>U</math> (V)</b>	x	110
	230	x
	400	440
	690	660
	1000	1100
	3000	3300
	6000	6600
	10500	11000

Mainitut jännitteet ovat kahden vaiheen välillä olevia jännitteitä. Joissain laivoissa on kokeiltu muuttuvaa taajuutta, joka on riippuvainen päämoottoriin kytketyn akseli-generaattorin nopeudesta. Suuret sähkölaitteet, kuten pumppujen moottorit, on suunniteltu toimimaan matalammalla taajuudella.[2]

Laivan keskijänniteverkko on useimmiten maadoitettu suuriohmisella vastuksella laivan runkoon generaattorin nollapisteestä. Laivan sähkölaitteet ovat joko yksivaiheisia tai kolmivaiheisia ilman nollajohdinta ja yksivaiheiset kuormat kytketään kahden vaiheen väliin. Pienjänniteverkko on useimmiten maadoittamaton. Poikkeus löytyy kuitenkin laivan keittiöstä, jossa laitteita syötetään omalla nollajohtimella varustetulla muuntajalla.[3]

Laivassa sähköverkon perusta on päätaulu, joka sijoitetaan lähelle energiantuotantoa (generaattoreita) ja erilliseen valvontahuoneeseen. Päätaulu on laivan pääsähkönjakelukisko, joka sisältää useita lähtöjä kuluttajille sekä tuloja generaattoreilta. Päätaulu on yleensä jaettu vielä kahteen tai useampaan osaan ja osat ovat erotettu katkaisijoilla. Päätaulusta jaetaan lähtöjä eteenpäin pienemmille sähkötauluille, kuten hätätauluille ja valaistustauluille. Osa suurista kuluttajista, kuten moottorit ja generaattorit, pitää olla kytkettynä suoraan päätauluun.[7]

Laivan sähköverkkoa käytetään säteittäisenä. Tämän ansiosta esimerkiksi häiriöiden leviämistä pystytään rajoittamaan ja suojaus pystytään toteuttamaan yksinkertaisemmin. Jännitteensäätö on myös helpompi toteuttaa. Kuvassa 2.1 on havainnollistettu verkon rakennetta.



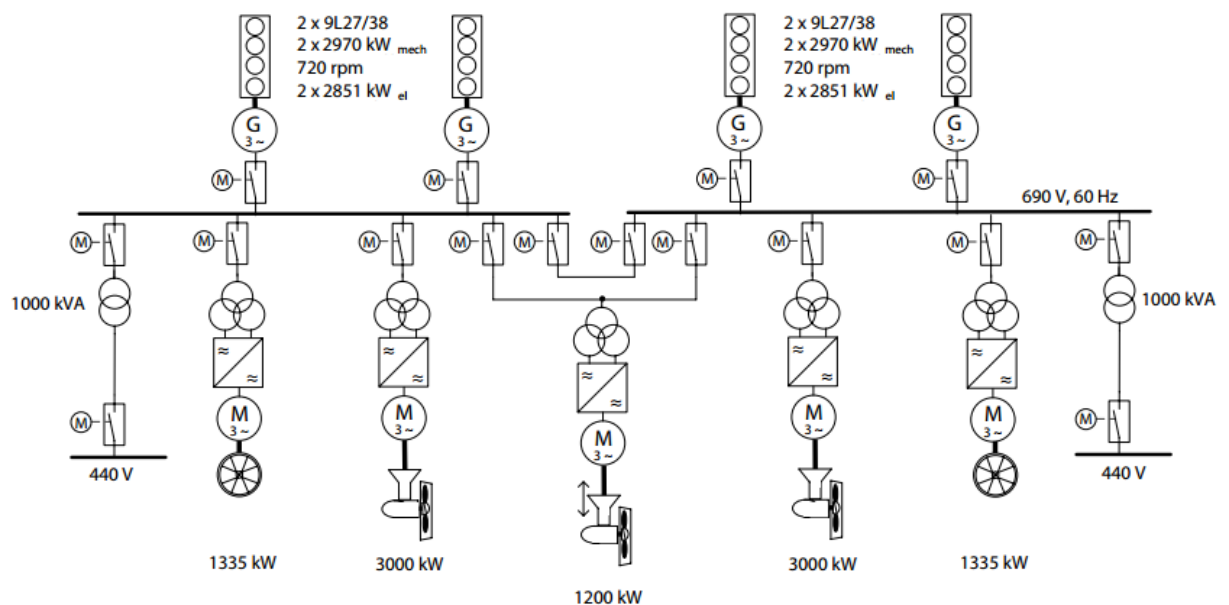
**Kuva 2.1.** Laivan sähköverkon yksinkertaistettu rakenne. Tehonsiirto on kuvattu punaisella ja tiedonsiirto sinisellä.[4]

Joitakin osia verkosta joudutaan kuitenkin luokituslaitoksen sekä turvallisuuden takia kahdentamaan ja tekemään verkosta osittain silmukoitu. Normaalitilanteessa katkaisijat, jotka tekevät verkosta silmukoidun, ovat auki. Laivalla pitää olla myös luokituslaitoksen määräyksestä muusta sähköverkosta riippumaton hätägeneraattori, joka on kytketty hätätaulujen kautta laivan hätäjakeluverkkoon. Hätägeneraattori on mitoitettu niin, että se pystyy syöttämään tärkeimpiä laitteistoja sähkökatkon aikana. Kriittisimmät laitteet, esimerkiksi merenkulkulaitteisto, varustetaan myös UPS- laitteistolla (engl. Uninterrupt-

tible Power Supply). Järjestelmän tehtävänä on taata katkeamaton sähkönsyöttö kaikissa tilanteissa. [7]

## 2.3 Sähköenergian tuotanto

Laivoissa sähköenergia tuotetaan vaihtosähkögeneraattoreilla, joita pyörittää useimmiten polttomoottori. Polttomoottorit käyttävät polttoaineenaan joko dieseliä tai raskasta polttoöljyä. Nykyään myös erilaiset kaasukoneet ja kaasuturbiinit ovat tulleet yleiseen käyttöön. Laivoissa on useimmiten 2-10 moottoria pyörittämässä generaattoreita ja generaattoreita löytyy yhtä monta kuin on moottoreitakin. Generaattorit kytketään suoraan päätauluun (kuva 2.2) syöttämään sekä päätö- että loistehoa. [8] Kuvassa 2.2 on havainnollistettu vielä yksiviivakaaviolla laivan sähköverkon rakennetta ja energiantuotantoa.



**Kuva 2.2.** Laivan sähköverkon yksinkertainen malli yksiviivakaaviolla esitettynä.[9]

Kuvassa ylimpänä ovat dieselmoottorit, jotka pyörittävät generaattoreita (merkitty G kirjaimella). Generaattorit on kytketty katkaisijan välityksellä pääkiskoon (päätauluun) ja pääkiskosta lähtee useampi lähtö erilaisille moottoreille ja pienemmille kuluttajille.

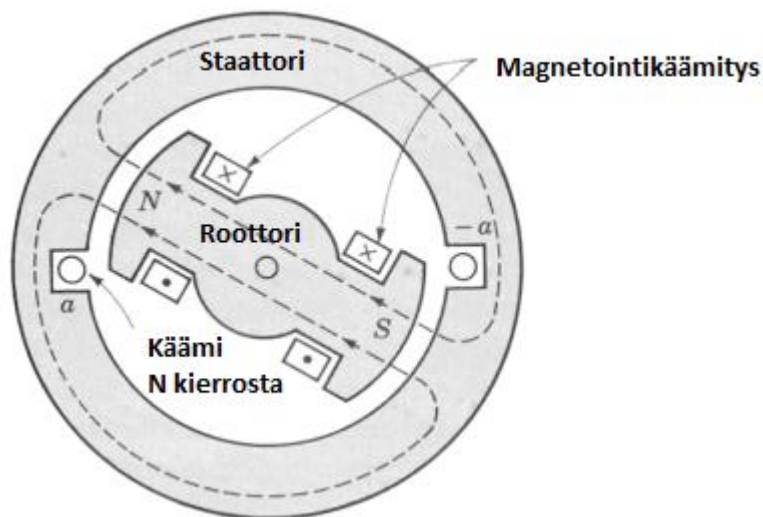
### 2.3.1 Generaattorit

Valtaosa sähköenergiasta tuotetaan vaihtosähkögeneraattoreilla. Vaihtosähkökoneet jaetaan kahteen eri luokkaan: epätahtikoneet ja tahtikoneet. Molempien toiminta perustuu pyörivään magneettikenttään koneen sisällä ja magneettikentän ja siinä olevan virallisen johtimen välisiin vuorovaikutuksiin. Kaikista sähkökoneista voidaan erottaa

perusosat, joita ovat pyörivä roottori akseleineen, staattori, laakerikilvet tai laakeripukit ja laakerit. Staattori on sähkökoneissa paikallaan oleva osa, joka sisältää staattorikäämityksen. Roottori on sähkökoneen pyörivä osa ja se pyörii laakereiden varassa staattorin sisällä. Staattorin ja roottorin välissä on ilmapäli niin, että roottori voi pyöriä vapaasti. Laakerit on kiinnitetty laakerikilpiin, jotka kannattavat roottoria. Koneen rungon muodostaa staattori, jossa laakerikilvet ovat kiinni. Koneissa on yleensä päällä liitinkotelo, johon voidaan liittää syöttökaapeli.[11]

Tahtikone on yleisin sähkökonetyyppi, kun tuotetaan sähköenergiaa. Vaihtosähkögeneraattorit ovat pääsääntöisesti tahtikoneita. Tahtikone on laite, jossa muuttuva magneettikenttä synnyttää generaattorin napojen välille jännitteen. Jännite syntyy pyörivän koneen käämeihin tai sauvoihin kolmella eri tavalla: käämejä pyöritetään magneettikentän läpi, pyöritetään magneettikenttää siten, että se ohittaa käämit tai suunnittelemalla magneettipiiri niin, että reluktanssi (”magneettinen vastus”) muuttuu roottoria pyöritettäessä. Kaikissa edellä mainituissa tapauksissa käämien kokema vuo muuttuu syklisesti, jolloin käämeihin indusoituu ajasta riippuva jännite. Generaattorin osaa, johon jännite indusoituu, kutsutaan ankkuriksi.[10]

Kuvassa 2.3 on esitettyä yksinkertaisen tahtigeneraattorin toiminnan peruseriaate. Jännite indusoituu tahtigeneraattorin staattoriin (ankkuriin), kun sen sisällä pyöritetään roottoria, joka on magnetoitu. Roottoriin synnytetään vakiomagneettivuo magnetoimalla roottorin magneettinavat tasavirralla.[10]



**Kuva 2.3.** Periaatekuva tahtigeneraattorista.[10]

Magnetointiin on käytössä eri menetelmiä. Harjallisessa generaattorissa roottorin magnetointikäämeihin johdetaan tasavirta liukurenkaiden ja metalli- grafiittiharjojen (”hiiliharjat”) kautta. Laivojen generaattorit ovat nykyään harjattomia. Niissä herätinkoneena

toimii pyörivä vaihtovirtageneraattori, jossa on kiinteä tasavirtaheräteköämitys.[2] Roottorissa voi periaatteessa olla myös kestopagneetit, mutta tällöin magnetoinnin säätö on ongelmallista.[10]

Generaattorin magnetointivirran säädöstä huolehtii automaattinen jännitteensäätäjä, AVR (engl. Automatic Voltage Regulator). Kun generaattorin magnetointivirtaa muutetaan, voidaan vaikuttaa generaattorin tuottamaan loistehoon ja tätä kautta jännitteeseen. Generaattorin napajännite muuttuu siihen liitetyn kuorman vaihdellessa ja AVR:n tehtävä on pitää jännitteenvaihtelu tietyissä rajoissa.[13] Luokituslaitos määrää, että generaattorin napajännitteenvaihtelu saa olla korkeintaan  $\pm 2,5$  % nimellisjännitteestä jatkuvassa tilassa ja transienttilassa  $-15$  % –  $20$  %.[21] AVR seuraa generaattorin napajännitettä ja muuttaa tarvittaessa käämien virtaa. Generaattorien toimiessa rinnakkain, AVR huolehtii, että loisteho jakaantuu niiden kesken tasaisesti.[13]

Tahtigeneraattorin nimi johtuu siitä, että tahtigeneraattorissa sähköinen nopeus tai taajuus on aina tahdissa mekaanisen nopeuden kanssa. Vaihtosähkökoneilla niin sanottu tahtinopeus (synkroninen pyörimisnopeus) määräytyy verkon taajuuden perusteella yhtälöllä:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p_n}, \quad (2.1)$$

missä  $n_s$  on tahtinopeus (r/min)

$p_n$  on napapariiluku

$f$  on taajuus (Hz)

Usein tahtikoneessa on enemmän napoja kuin kuvassa 2.3, jossa niitä on vain kaksi. Napaparin muodostaa aina kaksi napaa, pohjois- (N) ja etelänapa (S). Kuvassa 2.3 on siis yksi napapari.



Taulukkoon 2.2 on laskettu kaavan 2.1 avulla muutamia tahtinopeuksia eri napaparilukumäärällä ja kahdella eri taajuudella.[10]

**Taulukko 2.2.** 50 ja 60 Hz taajuudella pyörivän vaihtosähkökoneen tahtinopeuksia eri napaparilukumäärillä.

Napaparien lukumäärä	Tahtinopeus (rpm)	
	Taajuus	
	50Hz	60Hz
1	3000	3600
2	1500	1800
3	1000	1200
4	750	900
5	600	720
6	500	600
7	428	514
8	375	450
9	333	400

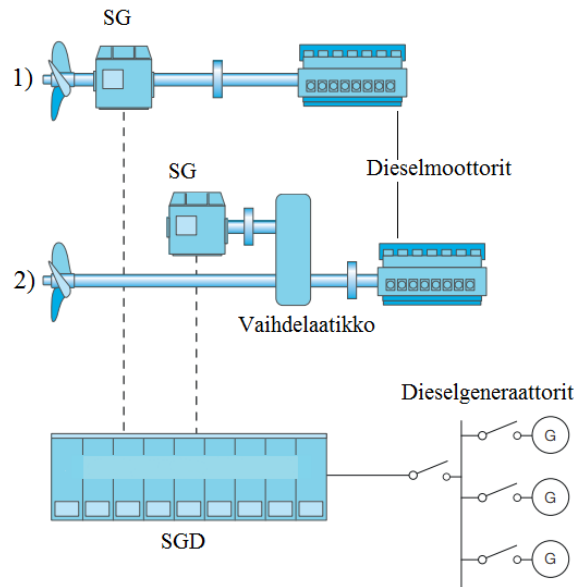
Taulukosta 2.2 huomataan, että mitä enemmän koneessa on napoja, sitä pienemmällä nopeudella sitä tarvitsee pyörittää tietyn taajuuden saavuttamiseksi. Tahtikone voi pyöriä vain yhtälön 2.1 mukaisella nopeudella. Jos koneen kuormitus kasvaa liian suureksi, kone putoaa tahdistasta ja se on otettava irti verkosta.[11] Taajuuden muutos saa luokituslaitoksen mukaan olla  $\pm 5 \%$  [21].

Laivoissa generaattoreiden koot vaihtelevat käyttötarkoituksen mukaan ja laivan koon mukaan. Esimerkiksi rahtilaivoissa yksittäisen generaattorin teho on noin 2 MVA, kun taas suurimmissa risteilijöissä generaattorin teho on 20 MVA.[12] Kun tahtikone kytetään verkkoon, tulee sen pyörimisnopeuden olla lähellä verkon taajuutta. Kun on kyse generaattorikäytöstä, generaattori voidaan kytkeä verkkoon, mikäli generaattorikatkaisijan yli oleva jännite on nolla. Tämän lisäksi generaattorin ja verkon taajuudet ja vaihejärjestykset on oltava samanlaiset. Tämän ansiosta vältetään generaattorin aiheuttama virtasysäys verkkoon päin. [11]

### 2.3.2 Akseligenaattorit

Akseligenaattorit SG (engl. Shaft Generator) ovat generaattoreita, joissa generaattorin roottori pyörii osana potkuriakselia. Akseligenaattori voidaan sijoittaa eri tavalla potkuriakselille esimerkiksi vaihteiston avulla. Akseligenaattorit on tehty joissain soveluksissa kaksisuuntaiseen tehonvirtaukseen, jossa generaattoria voidaan käyttää sekä moottorina että generaattorina. Tätä periaatetta kutsutaan PTI-PTO- konseptiksi (engl. Power Take-In – Power Take-Out). Nykyään voidaan siis olemassa olevia akseligenaattoreita laajentaa taajuusmuuttajilla, joilla voidaan pyörimisnopeuden vaihdella tuottaa vakiojännite. Akseligenaattori syöttää taajuusmuuttajaa, joka syöttää

sähkötehoa laivan sähköverkkoon. Taajuusmuuttajista kerrotaan tarkemmin kappaleessa 2.4.4. ABB:n versio kyseisestä taajuusmuuttajasta on akseligenaattorikäyttö SGD (engl. Shaft generator drive). Kuvassa 2.4 on havainnollistettu akseligenaattoreiden ja SGD:n sijaintia.



**Kuva 2.4.** SGD:n sijoittuminen ja akseligenaattorin asennusmahdollisuudet: 1) suoraan potkuriakselille 2) vaihdelaatikon välityksellä potkuriakselille. [14]

Kun akseligenaattoreita halutaan käyttää moottoreina (esimerkiksi hätätilanteessa), apukoneet (kuvassa dieselgeneraattorit) voivat syöttää sähköä SGD:lle ja SGD ohjaa akseligenaattorit toimimaan moottoreina. [14] Akseligenaattorien käyttö on yleistä laivoissa, joissa tarvitaan suurta sähkötehoa vain rajoitetun ajan tai poikkeustapauksissa. Akseligenaattorin ja dieselgeneraattorin rinnankäyttöä ei suositella, sillä merenkäynnissä taajuusheilahteluissa dieselgeneraattori voi ylikuormittua ja kytkeytyä irti verkosta.[2]

## 2.4 Sähköenergian kulutus

Laivan sähköverkossa kuluttajia ovat kaikki laitteet ja laitteistot, jotka on liitetty sähköverkkoon. Tähän kuuluvat muun muassa potkurikoneistot, jotka vastaavat laivan liikuttamisesta ja ovat suurimpia sähkön kuluttajia. Seuraavissa kappaleissa on käsitelty tärkeimmät ja suurimmat kuluttajat, joita laivan sähköverkosta löytyy.

### 2.4.1 Propulsiojärjestelmät

Laivoissa käytetään kahta erilaista propulsiojärjestelmää: mekaaninen propulsiojärjestelmä ja sähköinen propulsiojärjestelmä. Propulsiojärjestelmällä tarkoitetaan kuljetuskoneistoa, joka käsittää potkurien pyörittämiseen kytketyt moottorit tai turbiinit ja koko voimansiirtoketjun. Voimansiirtoketjun muodostavat potkuriakselit, laakerit, kytkimet, vaihteet sekä itse potkurit. Voimansiirtoketjusta käytetään myös nimitystä akselilinja. Sähköisen voimansiirron tapauksessa kuljetuskoneistoon lasketaan generaattorit, sähkömoottorit sekä tähän pääsähköverkkoon kuuluvat kaapelit ja laitteet.[19]

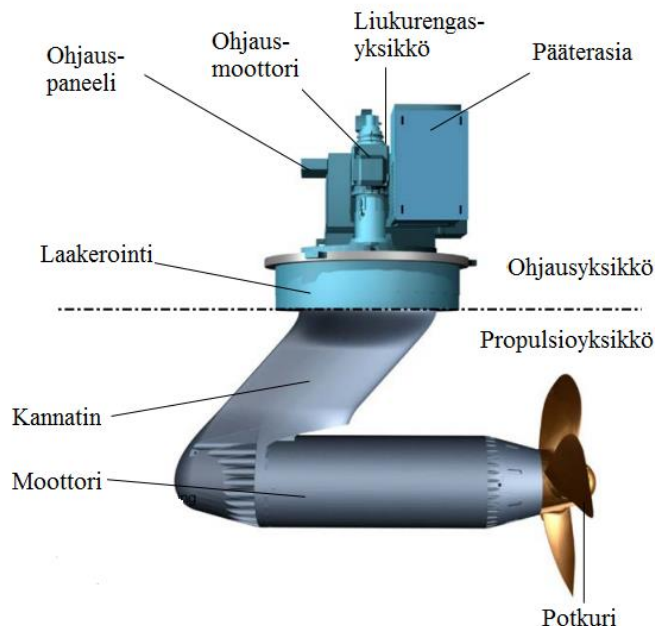
Mekaanisessa propulsiojärjestelmässä dieselmoottori pyörittää potkuriakselin ja vaihteiston välityksellä potkuria. Kyseisestä järjestelmästä käytetään myös nimitystä dieselmekaaninen propulsiojärjestelmä. Järjestelmässä dieselmoottorit jaetaan yleensä pää- ja apukoneisiin. Pääkoneet huolehtivat propulsiosta ja apukoneet sähköntuotannosta. Mekaaninen potkurikoneisto edellyttää, että dieselmoottori ja potkuri sijoitetaan samalle linjalle ja tasolle. Lisäksi mekaaninen propulsiojärjestelmä vaatii erillisen peräsimen. Järjestelmä on myös sidottu moottorin pyörimisnopeuteen. Pienillä nopeuksilla ajettaessa dieselmoottorin hyötysuhde ja käynti eivät ole optimaalisia.[19] Järjestelmä on hyvä, kun laivaa ajetaan normaalilla avomerinopeudella ja moottori on säädetty optimaaliselle kierrosalueelle. Tällaisia laivoja ovat esimerkiksi tankkerit ja rahtilaivat.[15]

Sähköisessä propulsiojärjestelmässä dieselmoottorit pyörittävät generaattoreita ja generaattoreiden tuottamalla sähköenergialla hoidetaan laivan propulsio. Järjestelmästä käytetään myös nimitystä dieselsähköinen propulsiojärjestelmä. Ensin mekaanisella energialla tuotetaan sähköenergiaa, jonka jälkeen sähköenergialla tuotetaan uudelleen mekaanista energiaa. Järjestelmää havainnollistavat kuvat 2.1 ja 2.2. Sähköinen propulsiojärjestelmä mahdollistaa dieselmoottoreiden ja generaattoreiden sekä potkurikoneiston sijoittamisen eri tasoille, sillä propulsiota vaativa teho siirretään sähköjohdoilla. Mekaanisessa järjestelmässä teho siirrettiin potkuriakselin välityksellä.[19]

Sähköinen propulsiojärjestelmä vähentää polttoaineen kulutusta ja päästöjä vaihtelevassa kuormituksessa, mahdollistaa luotettavan propulsiota ja jossain tapauksissa parantaa ohjattavuutta. Sähköinen järjestelmä on hyvä olosuhteissa, joissa tehontarve vaihtelee suuresti. Sähköisillä järjestelmillä pystytään hyödyntämään paremmin pienetkin kierrosnopeudet ja taajuusmuuttajan avulla säätö onnistuu helposti. Sähköinen propulsiojärjestelmä voi olla myös kaasu-sähköpropulsiojärjestelmä, jolloin laivan pääkoneet käyt-

tävät polttoaineenaan dieselin sijasta nesteytettyä maakaasua LNG:tä (engl. Liquefied Natural Gas).[9]

Ruoripotkurilaitteiden yhteydessä ei tarvita erillistä peräsintä. Ruoripotkurijärjestelmiä on kahdenlaisia: mekaaniset ruoripotkurilaitteet ja sähköiset ruoripotkurilaitteet. Mekaaniset ruoripotkurilaitteet jakaantuvat kahteen ryhmään voimansiirtojärjestelmien rakenteen mukaan. Z- käytössä on kaksi kulmavaihdetta ja voimansyöttöakseli vaakasuorassa. L- käytössä on yksi kulmavaihte ja käyttöakseli pystysuunnassa. Sähköisessä ruoripotkurikoneistossa potkuria pyörittävä moottori sijaitsee ruoripotkuriyksikön sisällä. Yhtenä esimerkkinä sähköisestä ruoripotkurikoneistosta on ABB:n Azipod (engl. Azimuthing Podded Drive).[18] Kuvassa 2.5 on esitelty Azipodin rakennetta.



**Kuva 2.5.** Sähköisen potkurikoneiston Azipodin rakenne. [16]

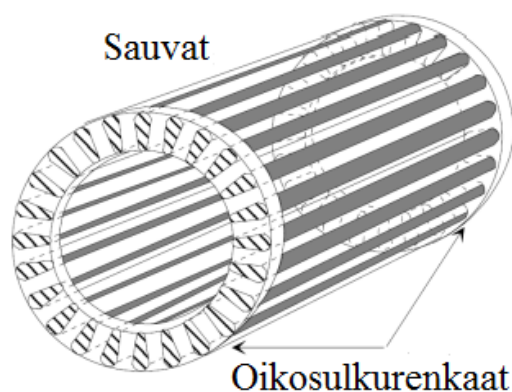
Kuvan 2.5 Azipodin moottori on tavallisesti tahtimoottori tai epätahtimoottori riippuen tehontarpeesta. Laakerointi on toteutettu tavallisesti kahdella laakeriyksiköllä: painelaakeri ja vierintälaakeri. Liukurengasyksikön kautta moottori saa tarvittavan virran. Ohjausmoottori huolehtii potkurilaitteiston kääntämisestä haluttuun suuntaan.[17]

## 2.4.2 Oikosulkumoottori

Kuten kappaleessa 2.3.1 todettiin, vaihtosähkökoneet jaetaan kahteen luokkaan: epätahtikoneet ja tahtikoneet. Kappaleessa todettiin, että generaattorit ovat tyypillisesti tahtikoneita. Epätahtikoneen nimitys tulee siitä, että koneen roottorin pyörimisnopeus poikkeaa koneen tahtinopeudesta eli koneen sisällä pyörivän magneettikentän pyörimisnopeudesta. Epätahtikoneet jaetaan kahteen ryhmään: oikosulkukoneisiin ja liukurengaskoneisiin.[11] Tärkein ja yleisin moottorityyppi teollisuuden puolella on epätahtikone ja erityisesti oikosulkumoottori.[10] Oikosulkukoneita käytetään myös monissa laivan sovelluksissa, erityisesti keulapotkurimoottoreissa ja erilaisissa pumpuissa. Sähköisissä potkurijärjestelmissä, joita käsiteltiin kappaleessa 2.4.1, on myös käytössä oikosulkumoottoreita. [2] Tässä kappaleessa keskitytään epätahtikoneista lähinnä oikosulkumoottoriin, vaikka epätahtikoneita voidaan käyttää myös generaattoreina.

Epätahtikone on tyypiltään joko oikosulkukone tai liukurengaskone riippuen siitä, onko roottorikäänitys oikosuljettu vai ei. Oikosulkukoneessa roottorin käänitys on ns. häkkikäänitys, joka on tehty uriin sijoitetuista eristämättömistä sauvoista ja sauvojen päät on kytketty toisiinsa oikosulkurenkaiden avulla. Kuvassa 2.6 on esitetty yksinkertainen häkkikäänityksen rakenne.[10]

Oikosulkumoottorin rakenne on yksinkertainen, jonka takia se on erittäin suosittu moottorityyppi. Oikosulkumoottoreissa ei ole erillistä magnetointikäänitystä, vaan ainoastaan melko yksinkertaiset staattori- ja roottorikäänitykset. Moottorin ainoat kuluvat osat ovat käytännössä laakerit. Liukurengasmoottorissa roottorikäänityksen toiset päät on kytketty koneen akselilla oleviin liukurenkaisiin, joita liukuharjat laahaavat.[11]



**Kuva 2.6.** Häkkikäänityksen rakenne.[10]

Kytettäessä jännite oikosulkumoottorin staattoriin, koneen sisälle syntyy pyörivä magneettikenttä. Magneettikentän kenttäviivat leikkaavat roottorikäänin sauvoja, jolloin

sauvoihin indusoituu jännite. Tällöin roottoriin syntyy roottorivirta. Roottorivirran ja pyörivän magneettikentän välinen voimavaikutus saa roottorin pyörivään liikkeeseen. Moottori alkaa pyöriä, kun sähköinen vääntömomentti on suurempi kuin roottoria jarruttavan kuorman vääntömomentti. Oikosulkumoottorin pyörimisnopeus ilmaistaan yleensä jättämän  $s$  avulla. Jättämän kertoo sen, kuinka paljon pienempi on roottorin todellinen nopeus tahtinopeuteen verrattuna. Jättämä ilmoitetaan prosentteina ja se lasketaan kaavasta:

$$s = \frac{(n_s - n_t)}{n_s} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

missä  $s$  on jättämä

$n_s$  on tahtinopeus (r/min)

$n_t$  on todellinen pyörimisnopeus (r/min)

Suurten epätahtikoneiden jättämät ovat noin yhden prosentin verran ja pienemmillä koneilla muutamia prosentteja. Oikosulkumoottorin pyörimisnopeus on riippuvainen kuormituksesta eikä ole siis vakio. Kun moottoria kuormitetaan, mekaaninen vääntömomentti kasvaa, joka vastustaa sähköistä vääntömomenttia. Tällöin pyörimisnopeus pienenee. Samalla roottorin virta kasvaa, koska roottorin ja staattorin välinen nopeusero kasvaa. Suurin momentti, millä moottoria voidaan kuormittaa, on sen huippumomentti ja tätä suurimmilla momenteilla moottori pysähtyy.[11] Jos moottorin ottama virta kasvaa liian suureksi, staattorissa käämit voivat tuhoutua. Tämän estämiseksi isojen moottoreiden käämeihin sijoitetaan lämpötila-anturit. Moottorin syöttöä valvoo ylivirtarele, joka sallii hetkellisen ylikuormituksen. Laivan sähköverkossa ei ole nollajohdinta, joten staattorikäämeissä suositetaan tähtikytkeä vaurion välttämiseksi maasulkutilanteessa.[2] Luokituslaitokset määrittävät rajat sallituille lämpötiloille moottorin eri osissa.[21]

Oikosulkumoottorin käynnistämisessä virta saattaa olla 5-10 kertaa suurempi kuin nimellisvirta. Suuren käynnistysvirran takia verkon jännite saattaa pudota liian alas ja aiheuttaa haittaa verkon muille kuluttajille tai generaattoreille. Tämän takia moottoria käynnistettäessä tulee käyttää muita ratkaisuja kuin suoraan verkkoon käynnistystä. Tähti-kolmiokäynnistyksessä käämeillä on ensin tähtikytkeä, jolloin vaiheiden välinen jännite on alempi. Tällöin myös virta ja momentti ovat pienemmät kuin normaalissa käynnistyksessä. Kun moottorin pyörimisnopeus nousee halutuksi, vaihdetaan käämit takaisin kolmio-kytkentään. Suuria tähtikäämittyjä moottoreita käynnistettäessä voidaan käyttää muuntajaa apuna. Muuntajan avulla jännitettä pudotetaan käynnistuksen alussa ja nostetaan sitten portaittain pyörimisnopeuden kasvaessa.[2] Jos moottorin pyörimisnopeutta ohjataan taajuusmuuttajalla, ei moottori tarvitse erillistä käynnistyslaitetta. Taajuusmuuttajan avulla käynnistysvirta voidaan pitää pienenä.[11]

### 2.4.3 Muuntaja

Muuntaja on rakenteeltaan halpa, helppokäyttöinen ja teoreettisesti yksinkertainen vaihtosähkölaite, joka mahdollistaa vaihtosähkön käyttämisen voimansiirtoon ja sähkönjakeluun. Muuntajan tärkein tehtävä on asettaa sähköverkossa jännitetaso edulliseen arvoon voimansiirron ja -jakelun kannalta. Muuntajan nimellisarvon valinnalla voidaan vaikuttaa esimerkiksi verkon oikosulkutehoon. Muuntajia valmistetaan pienistä signaalipiirien muuntajista suuriin tehomuuntajiin asti. Muuntaja on pyörimätön sähkökone, jossa erotetaan aktiiviset ja passiiviset osat toisistaan. Aktiivisiin osiin, jotka suorittavat muuntajan varsinaisen tehtävän, kuuluvat käämitykset ja rautasydän. Passiivisiin osiin kuuluvat muun muassa tukirakenteet, muuntajaöljy, eristimet ja jäähdytyslaitteet. [20]

Laivassa on käytössä eri tarkoituksiin soveltuvia muuntajia. Esimerkiksi jakeluun tarkoitetut muuntajat ja propulsiolaitteistolle tarkoitetut muuntajat ovat erikseen. Jakelumuuntajat jakavat sähköä jännitetason mukaan laivan eri sähkölaitteille ja propulsiomuuntajat muuttavat jännitteen sopivaksi taajuusmuuttajalle. Propulsiomuuntajat ovat teholtaan huomattavasti suurempia kuin jakelumuuntajat. [12]

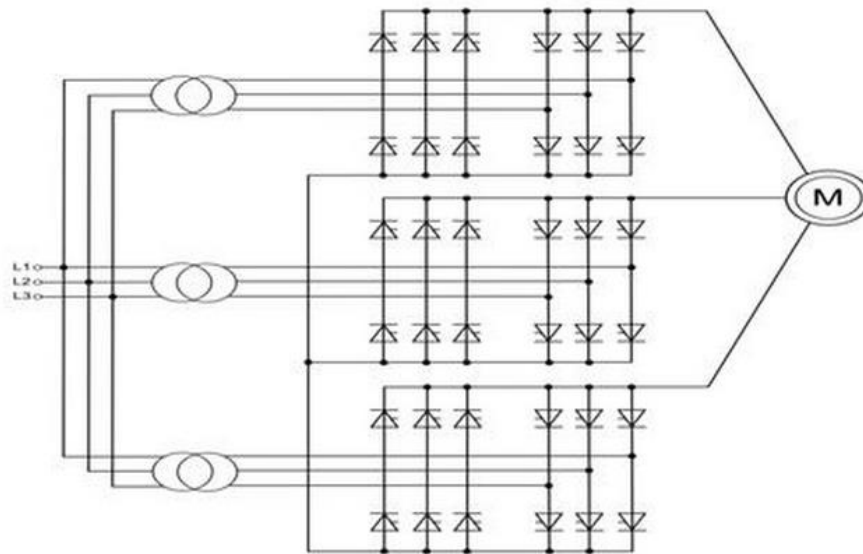
Luokituslaitokset asettavat muuntajille tiettyjä määräyksiä. Yleisesti aluksessa on käytettävä ilmajäähdytteisiä kuivamuuntajia. Jos muuntaja jäähdytetään jollakin nesteellä, pitää muuntajaan asentaa seuranta- ja hälytysjärjestelmä ja nesteen leimahduspisteen pitää olla riittävän suuri. Muuntajien on kestävä ensiö- tai toisiopiirin oikosulku yhden sekunnin ajan nimellisellä jännitteellä ja taajuudella. Jakelumuuntajien rinnankäytössä on ensiö- ja toisiopuolella käytettävä erotuskytkimiä ja muuntajat pitää varustaa asianmukaisella nimikyltillä, josta löytyy muuntajan perustiedot. [21]

### 2.4.4 Taajuusmuuttaja

Laivan sähköverkossa sähkömoottoreita ohjataan ja säädetään taajuusmuuttajilla. Taajuusmuuttaja muuttaa nimensä mukaisesti vaihtovirran ja -jännitteen taajuutta. Taajuusmuuttajat jaetaan kahteen eri luokkaan: välipiirilliset ja suorat taajuusmuuttajat. Sähköinen propulsio pystytään hyödyntämään paremmin taajuusmuuttajan avulla, jolloin sähkömoottorista saadaan paras ulostuloteho erilaisissa kuormitustilanteissa. Taajuusmuuttaja säätelee moottorin syötettävää jännitettä ja säätää tällä tavalla sekä moottorin tehoa että prosessia. Taajuusmuuttajien hyötysuhde on yleensä hyvin korkea, jopa 97-99 %. [22]

Syklokonvertteri on suora taajuusmuuttaja, joka muuttaa jännitettä ja taajuutta halutunlaiseksi suoraan ilman välipiiriä puolijohdekytkimillä. Syklokonvertterilla voidaan muuttaa vaihtojännitteen arvoa ja sen taajuutta joko yksivaiheisesta yksivaiheiseksi,

kolmivaiheisesta yksivaiheiseksi tai kolmivaiheisesta kolmivaiheiseksi. Kuvassa 2.7 on esitetty eräs kolmivaiheinen syklokonvertteri.[23]



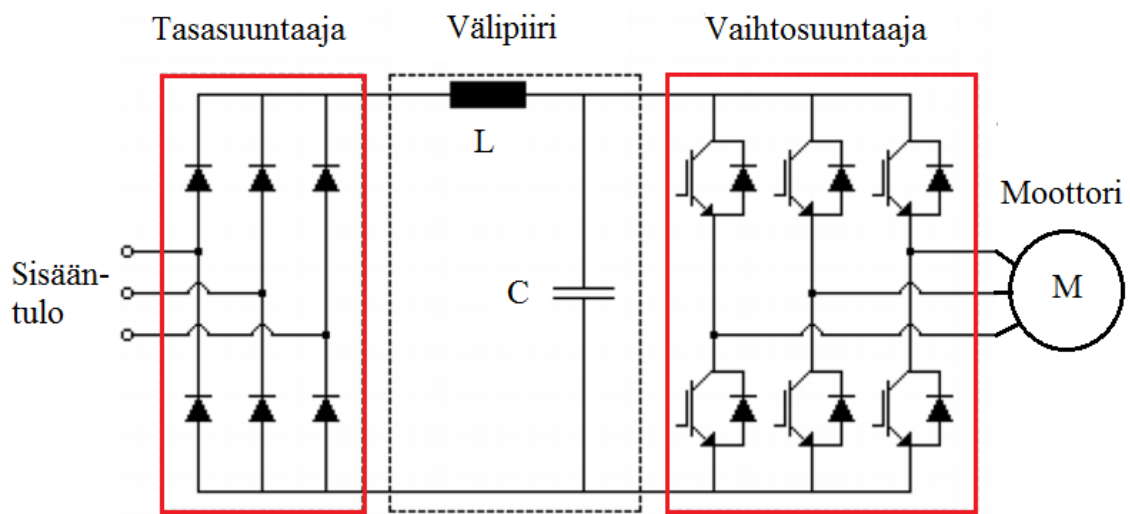
**Kuva 2.7.** Kolmivaiheisen syklokonvertterin piirikaavio.[25]

Kuvassa 2.7 kolmivaiheisen syötön eri vaiheet on kuvattu kirjaimilla  $L_1$ ,  $L_2$  ja  $L_3$ . Kolmivaiheista syklokonvertteria käytetään pääsääntöisesti tahtimoottorien ja epätahtimoottorien yhteydessä, sillä ne soveltuvat suurille tehoille. Syklokonvertterit toimivat erityisen hyvin tahtikoneiden ohjauksessa. Syklokonverttereista on olemassa kaksi päätyyppiä: estotila (engl. blocking mode) ja kiertovirta (engl. circulating current). Estotilassa konvertteri syöttää joko positiivisella tai negatiivisella puoliskolla kuormaa. Kiertovirtatyypissä positiivisen ja negatiivisen konvertteripuoliskon väliin on kytketty käämi, jolloin syntyy kiertävä virta. Kiertovirtatyypissä saavutetaan esimerkiksi korkeampi ulostulotaajuus ja säätö on helpompaa. [23] Syklokonvertterit ovat hyviä käytöissä, joissa pieni nopeus ja suorituskyky ovat olennaisia. Tällaisia aluksia ovat esimerkiksi jäänmurtaajat ja alukset, joilta vaaditaan hyvää ohjailtavuutta pienestä nopeudesta huolimatta.[1]

Välipiirillinen taajuusmuuttaja koostuu kolmesta osasta: tasasuuntaajasta, välipiiristä ja vaihtosuuntaajasta. Välipiirilliset taajuusmuuttajat jaetaan virtavälipiirillisiin CSI (engl. Current Source Inverter) ja jännitevälipiirillisiin VSI (engl. Voltage Source Inverter) taajuusmuuttajiin. Virtavälipiiri muodostuu kuristimesta, jolla tasoitetaan tasavirran aaltoisuutta. Jännitevälipiiri muodostuu puolestaan kondensaattorista, jolla pienennetään tasajännitteen aaltoisuutta. Kuvassa 2.8 on esitetty jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan rakenne ja osat.



Tasasuuntaaja muuntaa verkosta syötetyn vaihtojännitteen tasajännitteeksi. Tasasuuntaus tapahtuu puolijohdekomponenteista, esimerkiksi diodeista tai tyristoreista, koostuvalla sillalla. Tasasuuntaajan pulssiluku tarkoittaa suuntaajan kehittämän suodattamattoman tasajännitteen jännitepulssien lukumäärää syöttävän vaihtojännitteen yhden jakson aikana. Kuvassa 2.8 on esimerkki 6-pulssisesta tasasuuntaajasta. Vaihtosuuntaaja muuntaa tasajännitteen takaisin halutun suuruiseksi ja taajuiseksi vaihtojännitteeksi. Nyky päivän taajuusmuuttajien ulostulojännitettä säädetään pulssinleveysmodulaatiolla (PWM, engl. Pulse Width Modulation). Ulostulojännitteen keskiarvoa säädetään signaalin pulssisuhteen muutoksella ja pulssisuhteen muutos toteutetaan vaihtosuuntaajan kytkimien avulla.[24]



**Kuva 2.8.** Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja (muokattu lähteestä [24]).

Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan ulostulojännitettä voidaan säätää myös välipiirin tasajännitteen muutoksella. Tässä tapauksessa tasasuuntaajan diodisilta korvataan tyristorisillalla, jota voidaan ohjata. Tämä keino on kuitenkin hidas välipiirin suuren kapasitanssin vuoksi. PWM- tekniikka on yleisempi keino ulostulojännitteen säätämiseksi. [24] Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja on kaikkein käytetyin taajuusmuuttajatyyppeistä teollisuudessa. Hyvän suorituskyvyn ja tarkkuuden lisäksi se on joustava, sillä sitä voidaan käyttää sekä epätahtikoneiden että tahtikoneiden ohjauksessa. Ainoana huonona puolena on, että se ei sovellu yhtä hyvin suurille tehoille kuin syklokonvertteri. Se on hyvä 8-10 MW sovelluksissa, kun taas syklokonvertterin toiminta-alue on 2-22 MW. Tänä päivänä tehoelektronikan kehityksen myötä voidaan yltää kuitenkin jopa 30 MW lukemiin jännitevälipiirillisten muuttajien tapauksessa. [1]

### 2.4.5 Muut laitteet

Laivan sähköverkossa olevat muut kuluttajat ovat yleensä huomattavasti pienempitehoisia kuin esimerkiksi ruoripotkurikoneistot ja sähkömoottorit. Muita kuluttajia verkossa ovat laivan valaistus, johon kuuluvat navigointiin liittyvä valaistus sekä normaalivalaistus, sähkölämmitys, lastin käsittelylaitteet, kansikoneet, elektroniikka ja aluksen rungon katodinen suojaus.

Laivoissa valaistus toteutetaan pääsääntöisesti loisteputkilla, sillä niiden hyötysuhde (valon määrä/ watti) on hyvä ja käyttöikä on huomattavasti pidempi kuin hehkulampuilla. Hehkulampun ainoa etu on, että se on puhtaasti resistiivinen kuorma ja tehokerroin on tällöin 1. Loisteputkilla tehokerroin on noin 0,8. Hehkulamppujen hyötysuhde on kuitenkin matala. [7] Nykyään valaistusta on alettu korvata LED- tekniikalla, joiden energiankulutus on todella pieni. Esimerkiksi loisteputkia voidaan korvata vastaavilla LED- valoputkilla.[26] Valaistuksen tehontarve esimerkiksi rahtialuksissa on noin 25-70 kW kun taas risteilijöissä tehontarve on 500-800 kW.[2]

Sähkölämmitys jakaantuu laivoissa lähinnä polttoaineiden esilämmitykseen ja erilaisten asuintilojen lämmitykseen. Esimerkiksi keittiökoneet ovat yksi suurimmista kuluttajista. Elektroniikkalaitteisiin kuuluvat muun muassa sisäinen ja ulkoinen viestintäjärjestelmä, hälytysjärjestelmä, navigointi ja tietokonejärjestelmät. Nämä ovat kuitenkin varsin pieniä kuluttajia. Tietokoneet vaativat kuitenkin katkeamattoman virransyötön ja se edellyttää yleensä UPS- laitteiden liittämistä niihin. Aluksen rungon katodinen suojaus tarkoittaa suojausta korroosiota vastaan, mikä on meriolosuhteissa tavallinen ongelma.[2]

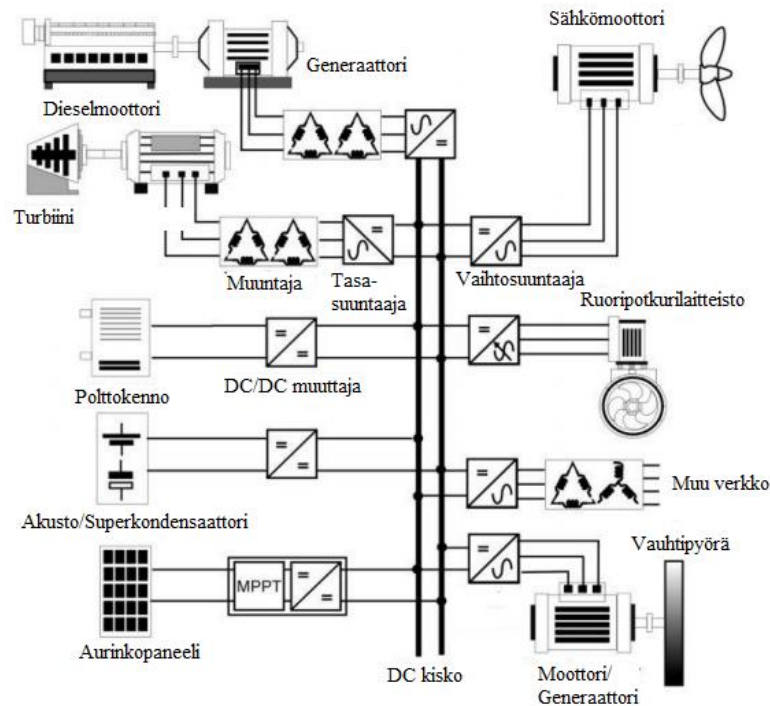
## 2.5 Tulevaisuuden ratkaisut

Tulevaisuudessa laivojen polttoaineenkäyttö pitää pystyä hallitsemaan entistä järkevämmin ilman, että propulsiolaitteiden tehokkuus ja laivojen suorituskyky kärsivät. Päästörajoitusten kiristyessä ja polttoaineen hinnan noustessa uusiutuvien energialähteiden sekä uusien energiantuotantojärjestelmien käyttöönotto tulee väistämättä ajankohitaiseksi. Laivojen suunnittelussa on alettu pohtia erityisesti niin kutsutun hybridipropulsion käyttöä sekä mahdollisesti täysin sähköllä kulkevan laivan potentiaalia. Seuraavissa kappaleissa on käsitelty lyhyesti hybridipropulsiota, DC- järjestelmää sekä akustojen mahdollisuutta laivojen energianlähteenä.

### 2.5.1 Hybridipropulsio ja DC järjestelmä

Nykyisissä diesel sähköisissä laivoissa on käytössä pääosin sähköinen propulsiojärjestelmä, jossa dieselmoottori pyörittää generaattoria. Generaattorilta saatavalla sähköllä syötetään muuntajan ja taajuusmuuttajan kautta sähkö potkurikoneistolle. Järjestelmään voidaan suunnitella hybridijärjestelmä tueksi, jolloin potkurikoneiston sekä laivan muun kulutuksen tarvitsema sähkö voidaan ottaa myös muilta energianlähteiltä. Sähköä voi-

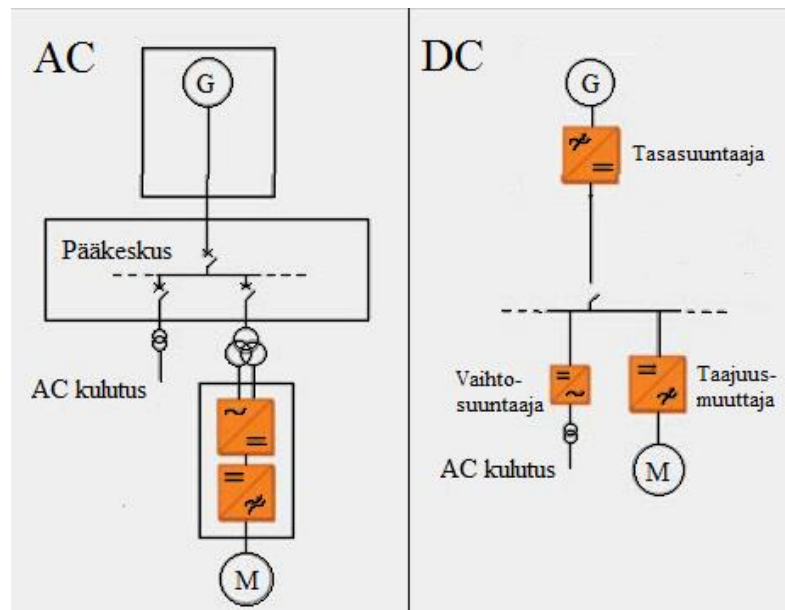
daan tuottaa esimerkiksi polttokennoilla, tuulivoimalla ja aurinkovoimalla ja varastoida se sitten akustoon. Myös niin kutsut superkondensaattorit ja vauhtipyörät ovat yksi vaihtoehto energian varastointiin. Kuvassa 2.9 on esitetty esimerkki hybridijärjestelmän kytkennästä ja rakenteesta.[27]



**Kuva 2.9.** Hybridijärjestelmä (muokattu lähteestä [28]).

Hybridipropulsiojärjestelmässä pääkiskona voi olla joko AC-kisko tai DC-kisko. Tulevaisuudessa DC-kiskon käyttö pääkiskona mahdollistaisi avoimen sähköverkon, jota on helppo muunnella. DC-kiskon ansiosta varsinaista päätaulua eikä propulsiomuuntajia enää tarvittaisi. Vaihtoehtoisten energialähteiden liittäminen verkkoon olisi helpompaa ja joustavampaa, kun välttyttäisiin vaihtosuuntaajien asennukselta. Kaikki tarvittavat suuntaajat ja taajuusmuuttajat olisivat lähellä kulutusta eikä tällöin tarvittaisi erillistä keskusta. Aluksessa komponentit voitaisiin sijoitella entistä joustavammin, jolloin joitakin tiloja saataisiin paremmin hyödynnettyä. Myös kaapelien ja kytkentöjen määrä laivassa vähenee, koska komponentteja tarvitaan vähemmän. [27]

Kuvassa 2.10 on vertailtu AC- ja DC- verkon rakennetta.



**Kuva 2.10.** AC- ja DC-verkon vertailu (muokattu lähteestä [27]).

Kaiken kaikkiaan hybridipropulsiojärjestelmä mahdollistaa paremman tehon säädettävyyden. Dieselmoottori saadaan käymään aina energiatehokkaimmalla kierrosalueella ja polttoainetta säästyy sekä päästöt vähenevät. Potkureita voidaan pyörittää joko dieselmoottorilla tai sähkömoottorilla jolloin järjestelmän luotettavuus myös paranee. Sähkömoottoreita voidaan syöttää akkujen tai muiden energiavarastojen kautta, mikäli laivan generaattori ja dieselmoottori ovat pois käytöstä. Aluksien melutaso myös laskee sähkömoottoreita käytettäessä. Dieselmoneiden ja apukoneiden huollon tarve myös vähenee, kun niitä käytetään vähemmän. [15] Hybridisovelluksien suurin haaste on tehonvirtauksen hallinta eri energialähteiden ja käyttölaitteiden välillä. DC- järjestelmän heikkoutena on suojauksen toteuttaminen. AC- virrat on paljon helpompi katkaista, koska niillä virran käyrämuoto ylittää nolapisteen puolijakson välein, jolloin katkaisu tehdään nolapisteen kohdalla. DC- katkaisijoita on olemassa, mutta ne ovat paljon monimutkaisempia, kalliimpia ja isompia kuin vastaavat AC- katkaisijat.[27]

## 2.5.2 Akusto

Akuston tehtävä on toimia energiavarastona sekä tasata sähkön tuotantoa ja kulutusta. Ylimääräinen energia voidaan varastoida akkuihin ja purkaa tarpeen vaatiessa. Akut voidaan laivoissa ladata esimerkiksi uusiutuvan energian, kuten aurinko- ja tuulivoiman, avulla sekä laivan ollessa satamassa maasähkön avulla. Nykyään yhä useampi laivan sähköjärjestelmien toimittaja tarjoaa akkuteknologiaan perustuvia ratkaisuja. Suurin osa

sovelluksista on hybridijärjestelmiä, jossa akku toimii osana sähköjärjestelmää. Maailmalta löytyy kuitenkin myös aluksia, jotka toimivat pelkästään akkujen avulla.[29]

Akku koostuu katodista (positiivinen elektrodi) ja anodista (negatiivinen elektrodi) sekä elektrolyytistä, joka mahdollistaa elektronien siirtymisen elektrodien välillä. Kun akku puretaan, siirtyvät elektronit ulkoisen piirin kautta anodilta katodille. Elektrolyysireaktiossa anodi hapettuu ja katodi pelkistyy. Latauksessa toiminta on päinvastaista. Akusta ilmoitetaan yleensä jännite sekä kapasiteetti. Kapasiteetti ilmoitetaan joko yksikössä wattitunti Wh tai yleisimmin yksikössä ampeeritunti Ah. Varteenotettavimmat akkutyyppit laivasovelluksiin ovat tällä hetkellä lyijyakku, litium-ioniakku, nikkeli-kadmiumakku, natrium-rikkiakku sekä virtausakku.[30]

Akkuja voidaan kytkeä sarjaan tai rinnakkain sen mukaan, kuinka paljon jännitettä ja virtaa halutaan. Sarjaan kytkettäessä jännite nousee, mutta virta pysyy samana. Rinnan-kytkennässä taas jännite on yhtä suuri kuin yksittäisen akun, mutta virta kasvaa. Yritys nimeltä Corvus Energy tarjoaa suuritehoisia energianvarastointijärjestelmiä teollisuuteen, muun muassa alusten hybridiratkaisuihin sekä kokonaan sähköllä toimiviin aluksiin. Taulukkoon 2.3 on koottu Corvus Energyn tarjoamasta litium-ioni akuista koostuvan järjestelmän rakenne ja teknisiä tietoja. 2S/12P merkintä kertoo kennojen sijoittelusta, jossa on kaksi 12 kennon sarjaa rinnakkain. [31]

**Taulukko 2.3.** *Corvus Energy:n akuston rakenne ja tekniset tiedot.[31]*

	<b>Yksittäinen kenno</b> (Litium-ioni)	<b>Akku</b> (koostuu 24 kennosta, 2S/12P)	<b>Akkupaketti</b> (21 akkua sarjassa)	<b>Ryhmä</b> (11 akkupakettia rinnan)
<b>Energia (20h)</b>	0,27 kWh	24×0,27 kWh = 6,5 kWh	21×6,5 kWh = 137 kWh	231×6,5 kWh = 1500 kWh
<b>Jännite</b>	4,2 V	12 × 4,2 V = 50,4 V	21 × 50,5 V = 1050 V	1050 V
<b>Kapasiteetti (20 h)</b>	75 Ah	150 Ah	150 Ah	11×150 Ah = 1650 Ah
<b>Paino</b>	-	70 kg	1470 kg	16170 kg

Taulukosta huomataan, että koko akustoryhmästä tulee suhteellisen painava. Hybridikäyttöä ajatellen laivassa olisi akuston lisäksi vielä painavat dieselmoottorit, generaattorit ja sähkömoottorit.

Maailman ensimmäinen täysin sähköllä kulkeva autolautta MF Ampere valmistettiin Norjassa Norled lauttayhtiön toimesta. Teknologiayritys Siemens toimitti kyseiseen autolauttaan propulsiojärjestelmän. Lautta palvelee Norjassa Lavik ja Oppedal kylien

välillä, joka on 6 kilometriä pitkä reitti per suunta. Yksi matka kestää 20 minuuttia ja lautta kulkee sen 34 kertaa päivässä. Lautta on 80 m pitkä, 20 m leveä ja se pystyy kuljettamaan 120 autoa ja 360 matkustajaa.[32] Kuvassa 2.11 on kuva MF Amperesta.



*Kuva 2.11. MF Ampere sähkölautta.[32]*

Lautassa on 2 sähkömoottoria, joiden tehot ovat 450 kW. Molempien energianlähteinä toimivat litium-ioniakustot, joiden yhdistetty kapasiteetti on 1000 kWh. Tämä riittää juuri kyseiseen matkaan ja lautta lataa joka kerta akustoaan päästyään satamaan. Ongelmaksi muodostui kuitenkin latausaika, joka sai olla maksimissaan 10 minuuttia. Kyseisellä alueella maasähköverkko oli kuitenkin liian heikko nopean latauksen aikaansaamiseksi. Tätä varten molempiin satamiin asennettiin puskuriakustot, joiden koko oli 260 kWh. Näiden avulla lauttaa ladataan aina satamassa. Yöllä, kun lautta ei liiku, lautta ladataan suoraan verkosta. [32]

### 2.5.3 Polttokennot

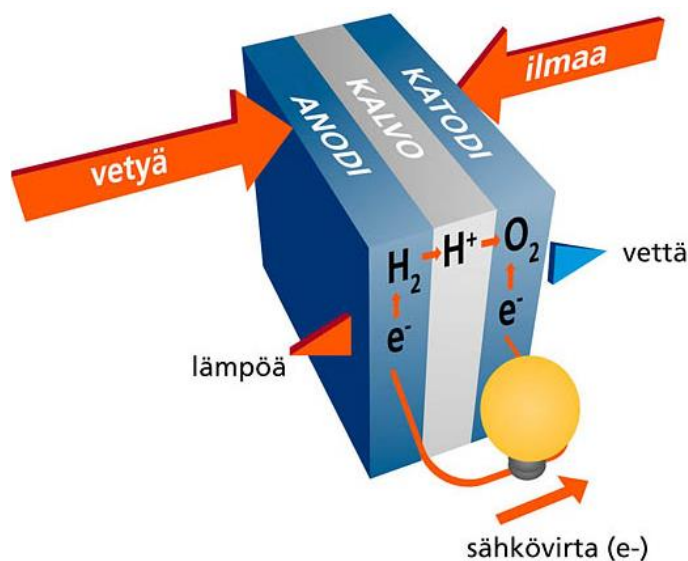
Polttokenno on sähkökemiallinen laite, joka tuottaa sähköenergiaa kemiallisen reaktion avulla. Kenno koostuu anodista ja katodista sekä niiden välillä olevasta elektrolyytistä. Tyypillisessä polttokennossa kaasumainen polttoaine (vety) syötetään jatkuvatoimisesti anodiin (negatiivinen elektrodi) ja positiiviseen elektrodiin eli katodiin syötetään vastaavasti happea. Tällöin sähkökemiallisen reaktion kautta syntyy tasasähkövirtaa. Lopputuotteena syntyy lisäksi lämpöä ja vettä. Yksi polttokenno tuottaa rajallisen jännitteen

ja vety- happi- polttokennon kohdalla jännite on noin 0,7 V. Akkujen tapaan kennoja voidaan kytkeä sarjaan tai rinnan kapasiteetin kasvattamiseksi.[34]

Polttokennot voidaan luokitella esimerkiksi polttoaineen mukaan, joita ovat muun muassa vety ( $H_2$ ), metanoli, diesel,  $NH_3$ , propaani ja butaani. Polttokennot voidaan jakaa myös elektrolyytin mukaan seuraaviin tyyppeihin:

- Kiinteä polymeerikenno (PEMFC, engl. Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
- Alkalipolttokenno (AFC, engl. Alkaline Fuel Cell)
- Fosforihappokenno (PAFC, engl. Phosphoric Acid Fuel Cell)
- Sulakarbonaattikenno (MCFC, engl. Molten Carbonate Fuel Cell)
- Kiinteäoksidikenno (SOFC, engl. Solid Oxide Fuel Cell)
- Suora metanolipolttokenno (DMFC, engl. Direct Methanol Fuel Cell)
- Reversiibelipolttokenno (RFC, engl. Reversible Fuel Cell). [35]

Kuvassa 2.12 on esitetty polttokennon toimintaperiaate, jossa polttoaineena on vety.



**Kuva 2.12.** Polttokennon toimintaperiaate.[33]

Polttokennon toiminta ja komponentit muistuttavat hyvin paljon akkuja, mutta eroavuu-  
det järjestelmien välillä ovat selkeät. Akku on energiavarasto, jolloin käytettävissä oleva  
maksimienergia määräytyy akkuun varastoituneiden reagoivien aineiden määrästä. Ak-  
ku pitää ladata, kun reaktiotuotteet on käytetty loppuun. Polttokenno sen sijaan muuntaa  
kemiallista energiaa sähköenergiaksi niin kauan kun siihen syötetään polttoainetta. Polt-  
tokennojärjestelmien keskeisimmät edut ovat korkea hyötysuhde, yksinkertainen raken-

ne (liikkuvia osia hyvin vähän), pienet päästöt ja hiljainen käyttö. Kaupallistumisen esteenä ovat muun muassa hinta, joka on vielä liian korkea. Lisäksi teknologia on suhteellisen vierasta ja polttokennojen käyttöikä rajallinen. Vedyn varastointiin ja siirtoon liittyy erikoisteknologiaa, jota ei ole suoraan saatavilla normaalissa energiaverkossa.[34]

Polttokennoja voidaan käyttää yhtenä energialähteenä laivoissa, joissa on dieselsähköinen propulsiojärjestelmä tai hybridipropulsiojärjestelmä. Huoltoalus *Viking Lady* oli ensimmäinen laiva, jossa testattiin polttokennoja suuremmassa mittakaavassa merikäytössä. Viking Ladyssa on pääpolttoaineena nesteytettyä maakaasua. Alus tarjosi hyvän testialustan polttokennoille, sillä polttokennoissa voidaan käyttää polttoaineena myös maakaasua.

Laivaan asennettiin 330 kW sulakarbonaattipolttokennojärjestelmä, joka kytkettiin vaihtosuuntaajan välityksellä laivan vaihtosähköverkkoon. Tällöin laivan sähköpropulsiojärjestelmä käytti generaattoreiden lisäksi polttokennoston sähköenergiaa energialähteenään. Polttokennojärjestelmä sekä tehoelektroniikkakomponentit (muuntajat, suuntaajat, DC- kisko) sijaitsivat omissa konteissaan, joiden yhteenlaskettu paino oli 110 tonnia. Laiva operoi testijakson aikana yhteensä 18 500 tuntia ja tämän jakson aikana järjestelmässä ei esiintynyt minkäänlaisia ongelmia. Polttokennojärjestelmän sähköntuotannon hyötysuhde mitattiin olevan noin 52 %. Dieselmoottorin hyötysuhde on noin 40–50 % [49]. Luokituslaitos ei luokitellut polttokennojärjestelmää laivan pää- tai apuvoimaksi, vaan ennemminkin lisävoimaksi. [36]



### 3. YLIAALLOT

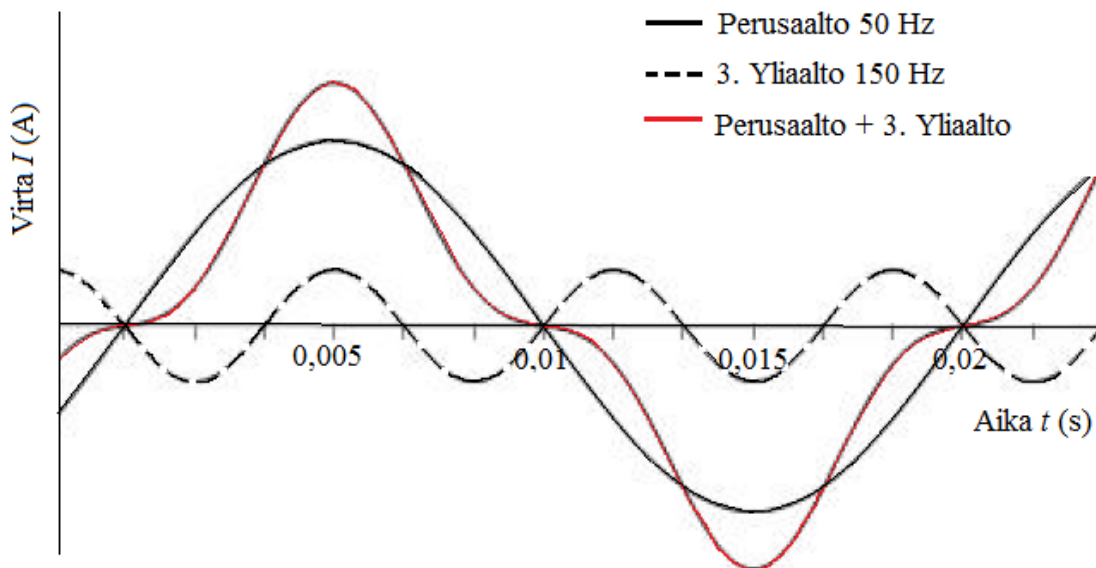
Monet risteilijät, rahtilaivat sekä muut alukset käyttävät kuljetuskoneistonaan diesel-sähköistä propulsiojärjestelmää. Potkurimoottoreita syötetään taajuusmuuttajilla, jotka sisältävät tehoelektroniikkaa. Laivan sähköverkosta löytyy lisäksi tasa- ja vaihtosuuntaajia, koska laivassa on tasasähkökäyttöjä ja vaihtosähkökäyttöjä. Kyseiset suuntaajat sekä muut epälineaariset kuormat eivät ota verkosta puhdasta sinimuotoista virtaa ja tuottavat tämän takia verkkoon yliaaltovirtoja. Yliaaltovirrat tuottavat puolestaan yliaaltojännitteitä kulkiessaan verkon impedanssien kautta. Yliaallot eivät ole haitallisia pelkästään niiden aiheuttajille, sillä ne leviävät verkkoa pitkin helposti myös muille sähkönkäyttäjille. Yliaaltojen määrää voidaan kuitenkin vähentää erilaisilla suodattimilla ja kompensointilaitteilla.[37] Seuraavissa kappaleissa on käsitelty tarkemmin yliaaltojen teoriaa, yliaaltojen lähteitä, haittavaikutuksia ja niiden torjuntaa.

#### 3.1 Harmoniset yliaallot

Useat kuormat ottavat sinimuodosta poikkeavaa virtaa, jolloin järjestelmän virrat ja jännitteet poikkeavat puhtaasta sinimuodosta. Poikkeava käyrämuoto voidaan ajatella koostuvan useasta eritaajuisesta sinimuotoisesta signaalista. Tällöin funktio voidaan hajottaa komponentteihinsa käyttämällä Fourier- analyysiä, johon yliaaltojen käsittely matemaattisesti perustuu. Eritaajuiset komponentit summautuvat siis perustaajuiseen virta- tai jännitekomponenttiin ja vääristävät perustaajuisen sinimuotoisen komponentin muotoa. Tästä vääristymisestä käytetään myös nimitystä säröytyminen.[38]

Jokainen vaihtovirran ja – jännitteen jakso koostuu tasakomponentista, perusaallosta sekä harmonisista yliaalloista. Tasakomponentti tarkoittaa jännitteen hetkellisarvojen pitkäaikaista keskiarvoa. Sinimuodosta poikkeavia suureita voidaan käsitellä harmonisten komponenttien avulla. Todellisen suureen ajatellaan muodostuvan summana (Fourier- sarja) eri taajuisista komponenteista, joiden taajuudet ovat tietyn perustaajuuden, esimerkiksi 50 Hz, kokonaisia monikertoja. Näistä käytetään nimitystä harmoniset yliaallot. Sähkövoimajärjestelmän vaihtosuureiden positiiviset ja negatiiviset puolijaksot ovat yleensä toistensa peilikuvia nollatason suhteen. Tällöin Fourier- sarja muodostuu 50 Hz:n taajuisen perusaallon lisäksi sen parittomista monikerroista. Harmoniset taajuudet olisivat siis 150 Hz (kolmas yliaalto), 250 Hz (viides yliaalto), 350 Hz (seitsemäs yliaalto) jne. [39]

Kuvassa 3.1 on esimerkki säröytyneestä virran käyrämuodosta (punainen käyrä) ja miten se on syntynyt perustaajuisesta 50 Hz:n aallosta ja 150 Hz:n taajuisesta kolmannesta yliaallosta.

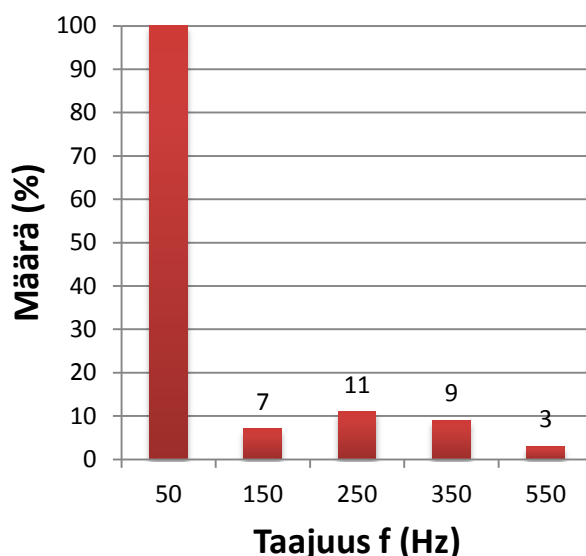


**Kuva 3.1.** Säröytynyt virran käyrämuoto, perusaallon ja kolmannen yliaallon summa (muokattu lähteestä [39]).

Pienjänniteverkon kuormilla harmonisista yliaalloista esiintyy lähinnä pienimmät monikerrat. Esimerkiksi loisteputkilamput aiheuttavat kolminkertaisella (150Hz) taajuudella värähteleviä yliaaltoja ja yksinkertaiset tasasuuntaajat viidennellä (250 Hz) ja seitsemännellä (350 Hz) harmonisella taajuudella värähteleviä yliaaltoja. Järjestysluvun kasvaessa harmonisten yliaaltokomponenttien amplitudit yleensä pienenevät.[41]

Kolmivaihejärjestelmissä vaihevirtojen summa on nolla, mikäli kaikkien vaiheiden virrat ovat sinimuotoisia ja yhtä suuria. Suurin osa harmonisista yliaaltotaajuuksista kumoutuu vaihevirtojen summautuessa, sillä ne ovat sopivasti vaihesiirrossa keskenään. Kolmas yliaalto sekä muut kolmella jaolliset yliaallot eivät sen sijaan kumoudu, koska ne sijoittuvat ajallisesti samaan kohtaan eri vaiheissa. Tästä seuraa, että ne vahvistuvat summakytkennässä kolminkertaisiksi. Vaihevirrat summautuvat nollajohtimeen, joten esimerkiksi kolmannen yliaallon esiintyessä nollajohtimessa kulkee kolme kertaa suurempi 150 Hz virta kuin vaihejohtimissa. [39]

Yliaallot esitetään yleensä kootusti spektriesityksenä. Taajuuskomponenttien joukkoa kutsutaan myös taajuusspektri, joka kertoo, mistä taajuuksista jännitteen tai virran säröytynyt käyrä muodostuu. X- akselilla on yliaaltokomponentin taajuus tai järjestysluku ja y- akselilla amplitudi. Amplitudi esitetään yleensä prosentteina perusaallon amplitudista. [38] Kuvassa 3.2 on esimerkki taajuusspektristä.



**Kuva 3.2.** Taajuusspektriesitys, jossa perusaaltona on 50 Hz:n aalto.

Kuvasta 3.2 nähdään nyt helposti, että esimerkiksi kolmannen yliaallon (150 Hz) osuus perusaallosta on 7 % ja viidennen yliaallon (250 Hz) 11 % jne. Yliaallot jaetaan järjestysnumeronsa perusteella eri komponentteihin: positiivisiin, negatiivisiin ja nollakomponentteihin. Komponenttiluokitus kertoo yliaallon vaiheosoittimen pyörimissuunnasta perustaajuuteen verrattuna. Taulukossa 3.1 on esitetty kyseinen komponenttijako eri taajuuksille.[38]

**Taulukko 3.1.** Yliaaltokomponenttien luokittelu.[38]

	Järjestysnumero								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Taajuus f (Hz)</b>	50	100	150	200	250	300	350	400	450
<b>Komponenttiluokka</b>	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Positiivisessa luokassa vaihejärjestys eli vaihekulma on sama kuin perusaallolla, eli yliaaltojen vaiheosoittimet pyörivät samaan suuntaan. Negatiivisessa luokassa vaihejär-

jestys on eri kuin perusaallolla, jolloin pyörimissuunta on vastakkainen perusaaltoon nähden. Nollaluokassa vaihekulma on kaikissa vaiheissa sama, joten yliaallot eivät pyöri. Yliaallot jaetaan myös parillisiin ja parittomiin yliaaltoihin. Normaalitylanteessa syntyy vain parittomia yliaaltoja, kun käyrämuoto on origon suhteen symmetrinen.[38] Verkossa voi esiintyä myös epäharmonisia yliaaltoja, jotka eivät ole perustaajuuden kerrannaisia. Niitä syntyy erittäin epälineaarisissa laitteissa, joiden ottama virta vaihtelee jännitejaksoista riippumattomasti. Niiden summautuessa verkkotaajuuden päälle, aiheutuu verkkotaajuuden sinimuotoon joko alle tai yli 50 Hz:n vaihtelua. Epäharmoniset yliaallot ovat kuitenkin harvinaisia eivätkä ole niin merkittäviä kuin harmoniset yliaallot.[40]

### 3.2 Jännite- ja virtasärö

Yliaaltojen jännitteitä ja virtoja voidaan arvioida yksittäin vertaamalla niiden suhteellista amplitudia perustaajuisen aallon amplitudiin. Kokonaisuutena harmonisia yliaaltoja voidaan kuvata harmonisella kokonaissärökertoimella eli THD:lla (engl. Total Harmonic Distortion). THD ilmaisee kaikkien harmonisten komponenttien tehollisarvojen ja perusaallon tehollisarvon suhteen ja se ilmoitetaan yleensä prosentteina. THD:n ollessa pieni signaalin taajuussisällöstä suurin osa koostuu perusaallon taajuisesta komponentista. THD jännitteelle ja virralle voidaan laskea seuraavilla kaavoilla:

$$THD_u = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{U_n}{U_1} \right)^2} \quad (3.1)$$

$$THD_i = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{I_n}{I_1} \right)^2}, \quad (3.2)$$

missä  $I_n$  ja  $U_n$  ovat  $n$ :n taajuisen komponentin tehollisarvot.  $I_1$  ja  $U_1$  ovat perustaajuisen komponentin tehollisarvoja.[41] Luokituslaitos asettaa rajat sallituille yliaaltomäärille ja esimerkiksi DNV määrittelee harmonisten yliaaltojännitteiden THD:n rajaksi 8 % [21].

### 3.3 Yliaaltojen lähteet

Yliaaltojen lähteitä laivan sähköverkossa ovat muun muassa erilaiset suuntaajat, taajuusmuuttajat, generaattorit, sähkömoottorit ja muuntajat. Näiden lisäksi myös valaistuskuormat ja UPS- laitteistot saattavat aiheuttaa haitallisia yliaaltoja verkkoon. Seuraavissa kappaleissa on käsitelty merkityksellisimmät yliaaltojen aiheuttajat.

#### 3.3.1 Suuntaajat

Tasa- ja vaihtosuuntaajissa peruskomponentteina on aina puolijohdekytkimiä, jotka ohjaavat virtapiirin virtaa. Puolijohdetekniikalla toteutetut suuntaajakäytöt ovat lisääntyneet muun muassa niiden korkean hyötysuhteen ja tarkan säädön takia. Lisäksi ne eivät sisällä kuluvia osia. Suuntaajasovelluksia ovat esimerkiksi elektroniikkalaitteiden verkkolaitteet, UPS ja moottorien pyörimisnopeuden säädöt. Niiden haittapuolena ovat kuitenkin niiden aiheuttamat yliaallot, sillä suuntaajien ottama virta ei ole sinimuotoista.[38]

Suuntaajien yliaaltojen tarkastelu perustuu ideaaliseen yliaaltoteoriaan, jossa vaihtovirtaverkko on symmetrinen ja jännite sinimuotoista, vaihtovirtaverkon impedanssi on nol-la, suuntaajan tasavirta on täysin tasaista, suuntaajan edessä ei ole kommutointikuristinta ja kaikkien tyristorien ohjauskulma on sama. Suuntaajien aiheuttamat yliaallot riippuvat pulssiluvusta ja niiden järjestysnumerot voidaan määritellä kaavalla 3.3.[1]

$$n = p \cdot k \pm 1, \quad (3.3)$$

jossa  $k$  on 1,2,3...  
 $p$  on suuntaajan pulssiluku

Kaavan perusteella siis esimerkiksi 6-pulssinen tasasuuntaaja tuottaa yliaallot  $n = 5, 7, 11, 13, 17, 19...$  12-pulssisella tasasuuntaajalla syntyvät vastaavasti yliaallot  $n = 11, 13, 23, 25...$  Suuntaajien synnyttämien yliaaltojen suuruus ideaalitapauksessa voidaan arvioida jakamalla perustaajuinen virta yliaallon järjestysluvulla.[43]

Taulukossa 3.2 on esitetty prosentteina ( $I_n/I_1$ ) teoreettinen ja tyypillinen kolmivaiheisen suuntaajan (6- ja 12- pulssinen) yliaaltosisältö. Yliaaltosisältö on annettu 100 % kuorimituksella. Taulukosta 3.2 huomataan, että 6-pulssisen suuntaajan aiheuttama yliaaltojen määrä on huomattavasti suurempi kuin 12-pulssisen.

**Taulukko 3.2.** Kolmivaiheisen suuntaajan teoreettiset ja tyypilliset yliaaltopitoisuudet prosentteina.[43]

Yliaallon järjestysluku	6-pulssinen suuntaaja (teoria)	6-pulssinen suuntaaja (tyypillinen)	12-pulssinen suuntaaja (teoria)	12-pulssinen suuntaaja (tyypillinen)
5.	20	63	-	3,6
7.	14	54	-	2,6
11.	9	10	9	7,5
13.	8	6,1	8	5,2
17.	6	6,7	-	1,2
19.	5	4,8	-	1,3

Taajuusmuuttajien yliaaltoja voidaan arvioida edellä esitetyllä tavalla. Virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja (CSI) tuottaa harmonisten yliaaltojen lisäksi myös epäharmonisia yliaaltoja, jotka johtuvat muuttajaan kytketystä moottorista.

Epäharmonisen komponentin taajuus voidaan laskea kaavalla 3.4.[1]

$$f_i = n \cdot f_1 \pm p \cdot f_M \quad (3.4)$$

jossa  $f_i$  on Epäharmoninen taajuus  
 $n$  on Suuntaajan harmonisen komponentin järjestysluku (5,7,11,13 jne.)  
 $f_1$  on Syöttävän verkon taajuus  
 $p$  on Suuntaajan pulssiluku  
 $f_M$  on Syötettävän koneen taajuus

Syklokonvertterien tuottamien yliaaltojen järjestysluvut riippuvat sisäänmenopiirien tyristorisuuntaajien pulssiluvusta. Kolmivaiheinen syklokonvertteri tuottaa yliaaltoja, joiden järjestysluvut riippuvat syklokonvertterin ulostulotaajuudesta  $f_2$ .

Kaavalla 3.5 voidaan laskea syklokonvertterin tuottamien yliaaltojen järjestysluvut.[44]

$$n = (k \cdot p \pm 1) \pm 6 \cdot m \cdot \frac{f_2}{f_1}, \quad (3.5)$$

jossa  $f_2$  on Syklokonvertterin ulostulotaajuus  
 $n$  on Yliaallon järjestysluku  
 $f_1$  on Syöttävän verkon taajuus  
 $p$  on Pulssiluku  
 $m$  on 0,1,2,3...  
 $k$  on 1,2,3...

Yliaaltojen amplitudit ovat riippuvaisia kuormituksesta, kuormituksen tehokertoimesta, siltojen ohjausasteesta sekä siltojen ohjaustavasta. Syklokonvertterien kohdalla epäharmoniset yliaallot saattavat olla suurempia kuin harmoniset yliaallot.[44]

### 3.3.2 Muuntajat

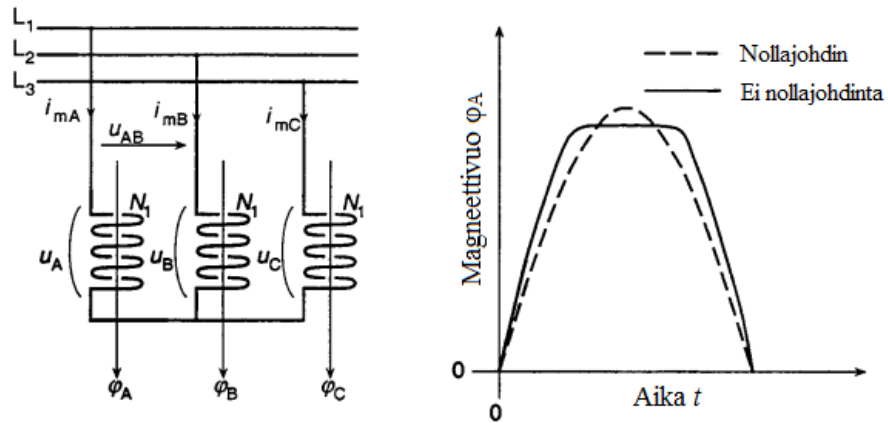
Muuntajissa yliaaltojen syntyminen perustuu raudan magneettiseen epälineaarisuuteen. Kun rautaan vaikuttaa sinimuotoisesti vaihteleva magneettikenttä, raudassa vaikuttava magneettikenttä voi olla samallakin ulkoisen magneettikentän voimakkuudella eri suuri riippuen siitä, onko ulkoisen kentän voimakkuus kasvamassa vai pienemässä. Ilmiö, jossa raudan magnetoituminen tapahtuu vaihtelevalla virralla eri käyriä pitkin, kutsutaan hystereesiksi.[20]

Muuntajan rautasydämen hystereesistä johtuen magnetointivirta ei noudata syöttöjännitteen käyrämuotoa eli se ei ole sinimuotoista. Kun syöttöjännite nostetaan yli nimellisen, joudutaan sydämen kyllästysalueelle ja yliaaltojen määrä kasvaa huomattavasti. Muuntajaan saattaa syntyä myös parillisia yliaaltoja, jos pienikin toisiossa esiintyvä tasavirta kyllästyttää muuntajan sydämen. Tasakomponentti syntyy muun muassa puolialto-tasasuuntauksesta.[38]

Muuntajan kytkentä, sydämen rakenne ja maadoitustapa vaikuttaa siihen, miten rautasydämen epälineaarisuus näkyy jännitteen tai magnetointivirran yliaaltolina ja yliaaltojen leviämisessä. Jakelumuntajan sydämen rakenne on epäsymmetrinen, joka koostuu kolmesta ”pylvästä”. Keskipylvään reluktanssi ja magnetointivirta on pienempi kuin reunapylväiden. Muuntajissa ensiöpuolen nollajohdin on hyvin harvinainen. Nollajohdon puuttumisen takia muuntajan magnetointivirrasta puuttuvat kolmella jaolliset yliaallot ja magnetointivirta on tällöin lähes sinimuotoinen. Kolmella jaolliset yliaallot summautuisivat muussa tapauksessa nollajohtimeen.

Kun nollajohtoa ei ole, hystereesikäyrän muodon edellyttämälle yliaaltovirralla ei ole kulkutietä. Ensiön tähtikytkennässä rautasydämessä kulkeva vuo on litistynyt ja eri vaiheiden pylväissä kulkeva vuo sisältää yliaaltoja. Yliaallot summautuvat sydämessä kier-

täväksi nollavuoksi. Tällöin vaihejännitteet eivät voi olla sinimuotoisia, koska vuokaan ei ole. Vaihejännitteissä on havaittavissa vuon muotoa vastaavat jänniteylijäallot. Pääjännitteestä kolmansia yliaaltoja ei voida havaita, sillä vaihekulmaero puuttuu. Kuvassa 3.3 on havainnollistettu magneettivuon vääristymistä, kun ensiössä ei ole nollajohtoa. [38,20]



**Kuva 3.3.** Magneettivuon vääristyminen nollajohtimen puuttuessa ensiöstä.[20]

Kuvassa 3.3  $i_{mA}$ ,  $i_{mB}$  ja  $i_{mC}$  kuvaavat eri vaiheiden magnetointivirtoja.  $\phi_A$ ,  $\phi_B$  ja  $\phi_C$  ovat magneettivuot eri vaiheissa. Toision kytkentä vaikuttaa myös syntyviin yliaaltoihin. Kun ensiössä vuo ja vaihejännitteet litistyvät nollajohtimen puuttuessa, toisioon indusoituu myös vastaavat yliaaltojännitteet. Toision ollessa kolmiokytketty, indusoituvat yliaaltojännitteet saavat aikaan kolmiossa kiertävän kiertovirran (nollavirran), joka vaimentaa rautasydämessä kulkevaa nollavuota ja vastaavasti vuon ja vaihejännitteiden sisältämiä yliaaltoja. Jos ensiössä on nollajohto, toision kolmiokytkentä vaimentaa ensiön vaihevirtojen kolmansia yliaaltoja ja nollajohdossa kulkevaa summavirtaa. Ensiön ollessa kolmiokytketty kolmio tarjoaa kiertotien yliaaltovirroille, jolloin verkosta otettu magnetointivirta ei sisällä kolmella jaollisia yliaaltoja. Tällöin vuo ja jännite pysyvät sinimuotoisina. Yliaaltoja ei synny pelkästään muuntajaraudan epälinearisuuden vuoksi. Muuntajiin kytketyt kuormat aiheuttavat muuntajan käämitysten virtoihin myös muita yliaaltoja oman magnetointivirran aiheuttamien lisäksi. Nämä on huomioitava muuntajan mitoituksessa, sillä ne aiheuttavat ylimääräistä lämpenemistä.[20]

### 3.3.3 Muut lähteet

Moottoreissa ja generaattoreissa jännitteen säröytymistä ja yliaaltoja esiintyy myös jonkin verran niiden käämitysrakenteiden ja magneettipiirin raudan kyllästymisen takia. Sähkökoneissa ilmavälin vuontiheyden jakaantuminen pyritään saamaan sinimuotoiseksi. Magneettivuo ei ole täysin sinimuotoista urakäämitystä käytettäessä ja moottoreissa



esiintyy yleensä eniten viidettä ja seitsemättä yliaaltoja. Generaattoreiden kohdalla kolmas yliaalto on kaikkein merkityksellisin. Todella suurissa sähkökoneissa yliaaltojen esiintyminen on hyvä huomioida, mutta näiden merkitys on käytännössä vähäinen.[41]

Laivan valaistus toteutetaan pääsääntöisesti loisteputkilla. Loisteputkien huono puoli on niiden kehittämät yliaallot. Nykyään on saatavilla valaisimia, joiden tehokertoimia on korjattu yliaaltojen vähentämiseksi. Myös muut elektroniikkalaitteet, kuten tietokoneet ja televisiot, aiheuttavat verkkoon yliaaltoja. Verkon yliaaltoja aiheuttavista kuormituksista ja syöttävästä verkosta riippuen loistehon kompensointiin käytettävät rinnakkais-kondensaattoriparistot saattavat muodostaa resonanssiipiirejä verkon induktanssien kanssa. Resonanssiipiirien seurauksena yliaallot voivat vahvistua merkittävästi.[44]

Osa UPS- laitteistoista voivat aiheuttaa paljon yliaaltoja ja ongelmia verkkoon, vaikka niiden käytöllä pyritään parantamaan sähkön laatua. UPS- laitteet, joita ei ole huollettu vähään aikaan, aiheuttavat eniten häiriötä kuivahtaneiden akkujen takia. Akkujen suuri-tehoiset laturit ja muut tasasuuntaajat ovat välillä melkein tyhjäkäynnillä ja hetken kulluttua täydellä teholla, josta aiheutuu ongelmia sähkön laadun näkökulmasta.[44]

### 3.4 Yliaaltojen haittavaikutukset

Yliaallot aiheuttavat erilaisia haittoja sähköverkon komponenteissa. Pääsääntöisesti yliaallot kasvattavat häviöitä, alentavat laitteiden kuormitettavuutta ja aiheuttavat laitevaurioita. Lisäksi ne voivat aiheuttaa mittarilaitteistoissa virhelukemia ja automaatiolaitteiden ja suojareleiden virhetoimintoja. Yleensä pienitaajuiset yliaallot ovat merkityksellisiä komponenttien laitteiden lämpenemisen kannalta ja suuritaajuiset yliaallot aiheuttavat häiriötä ääni- ja radiotaajuudella. Yhtenä suurimpana haittailmiönä yliaaltoihin liittyen on resonanssi. Seuraavissa kappaleissa on käsitelty tärkeimpien komponenttien osalta yliaaltojen haittoja ja resonanssi- ilmiötä.[44]

#### 3.4.1 Muuntajat

Muuntajissa tapahtuvat häviöt voidaan jakaa tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöihin. Yliaalloilla on vaikutusta näiden suuruuteen ja edelleen muuntajan kuormitettavuuteen. Tyhjäkäyntihäviöt (rautahäviöt) ovat magneettivuon vaihtelun aikaansaamia häviöitä muuntajan rautasydämessä ja ne voidaan jakaa hystereesihäviöihin ja pyörrevirtahäviöihin. Tyhjäkäyntihäviöt ovat riippumattomia kuormituksen suuruudesta, mutta ovat riippuvaisia jännitteestä ja taajuudesta. Jänniteyliaallot lisäävät pyörrevirtahäviöitä ja hystereesihäviöitä muuntajan rautasydämessä. Muuntajan tyhjäkäyntihäviöt yliaaltojen esiintyessä kasvavat 1-2 %. Lisääntyneillä tyhjäkäyntihäviöillä on merkitystä, mikäli muuntaja on magneettisesti kyllästynyt esimerkiksi virrassa esiintyvän tasakomponentin takia.[38] Mittausten mukaan tasakomponentin ollessa 2 % toision nimellisvirrasta, kasvavat tyhjäkäyntihäviöt 10 %. Pienikin tasajännite saa muuntajassa aikaan suuren vir-

ran, koska käämien resistanssi on pieni. Magnetointivirta kasvaa voimakkaasti, jos rautasydän kyllästyy.[44]

Kuormitushäviöt syntyvät muuntajan käämien vastuksissa virran vaikutuksesta. Kuormitushäviöt ovat monta kertaa suuremmat tyhjäkäyntihäviöihin verrattuna, joten ne muodostavat suurimman osan kokonaishäviöistä. Suurin vaikutus kuormitusvirran sisältämällä yliaalloilla on muuntajan resistansseissa syntyviin virtalämpöhäviöihin. Virtalämpöhäviöiden kasvu yliaaltojen vaikutuksesta perustuu virranahtoon, jolloin käämien resistanssi kasvaa suuremmilla taajuuksilla.[38]

Yliaaltopitoisella virralla muuntajan kuormitettavuus on pienempi kuin perustaajuisella virralla. Muuntajaa mitoitettaessa on huomioitava muuntajan lämpeneminen, sillä yliaallot aiheuttavat suuremman lämpenemän kuin perustaajuinen virta ja jännite. Muuntaja ei saa lämmetä liikaa nimelliskuormallaan. Jos esimerkiksi tasavirtakäyttöjen syöttömuuntajaa kuormitetaan nimellisvirrallaan, kasvavat muuntajan kuormitushäviöt 10-20 % sinimuotoiseen virtaan verrattuna.[38] Muuntajien kertoimella  $K$  voidaan arvioida yliaaltojen aiheuttamien häviöiden määrää. Kerroin  $K$  ilmaisee muuntajan kykyä käsitellä epälineaarista kuormitusta ja sen avulla voidaan siis määrittää muuntajan maksimi kuormitusvirta kertomalla nimellisvirta  $K$ :lla yliaaltopitoisessa kuormituksessa. Lisäksi muuntajan todellinen kuormitettavuus yliaaltopitoisella kuormalla saadaan selville jakamalla nimellinen kuormitettavuus kertoimella  $K$ .[45]

### 3.4.2 Moottorit ja generaattorit

Yliaallot aiheuttavat moottoreissa ja generaattoreissa virtalämpöhäviöitä, mekaanista värähtelyä sekä tärinä- ja ääni-ilmiötä. Mekaaninen värähtely aiheutuu värähtelevästä momentista, joka johtuu yliaaltovirroista ja perustaajuisesta magneettikentästä. Oikosulkumoottoreissa virtalämpöhäviöt ovat merkittävimpiä ja tyhjäkäyntihäviöiden eli rautahäviöiden kasvulla ei ole niin suurta merkitystä. Virtalämpöhäviöt johtuvat virranahdosta samalla tavalla kuin muuntajien kohdalla.

Häviöitä aiheutuu lähtökohtaisesti moottorien staattorikämmityksissä ja roottorikämmityksissä. Jos roottorissa on esimerkiksi syväurakäämitys, yliaallot voivat aiheuttaa merkittävää lisälämpenemistä. Yliaaltojen komponenttiluokituksen mukaisesti positiiviset yliaallot pyörivät samaan suuntaan perusaallon kanssa, jolloin ne lisäävät koneen momenttia ja tukevat pyörimistä. Sen sijaan negatiiviset yliaallot jarruttavat konetta aiheuttaen lisähäviöitä. Kun käytetään taajuusmuuttajaa moottorin syöttämisessä, saa oikosulkumoottoria kuormittaa 90 % nimellisestä. Häviöiden kasvaessa moottorin hyötysuhde laskee ja eristeet vanhenevat nopeammin.[38,41]

Tahtikoneissa häviöitä aiheutuu samoista syistä kuin epätahtikoneilla. Yliaallot aiheuttavat tahtikoneissa suurempia häviöitä kuin esimerkiksi muuntajissa johtuen niiden suuremmasta reaktanssista ja impedanssista. Tahtikoneissa yliaaltojen suurin vaikutus koh-

distuu roottoriin. Suuria generaattoreita käytetään yleensä maksimiteholla ja tällöin ne ovat herkkiä yliaaltojen aiheuttamalle lisälämpenemiselle. [38]

### 3.4.3 Suuntaajat ja kompensointilaitteet

Suuntaajat ovat pahimpia yliaaltojen lähteitä, mutta ne vaativat kuitenkin toimiakseen hyvän verkkojännitteen käyrämuodon. Yliaallot ja jännitesärö aiheuttavat ongelmia ohjattavien puolijohdekytkimien, esimerkiksi tyristorien, tarkassa syttymisessä. Tämän seurauksena syntyy ohjauskulmavirheitä ja pahimmillaan voi syntyä positiivinen takaisinkytkentä. Kaiken kaikkiaan yliaallot aiheuttavat suuntaajiin ylimääräistä rasitusta ja hyötysuhde heikkenee.[38] Suuntaajakäytöt voivat aiheuttaa myös kuormitusvirran tai syöttöjännitteen tasakomponentin. Merkittäviä tasakomponentin aiheuttajia ovat puolialtotasasuuntaus, puoliksi ohjatut tyristorisillat, tyristorien ohjauskulmavirheet ja vioittuneet tyristorikäytöt. Tasakomponentti haittaa esimerkiksi muuntajien toimintaa, niin kuin kappaleessa 3.4.1 todettiin.[44]

Kondensaattoriparistoja käytetään sähköverkoissa pääsääntöisesti loistehon kompensointiin. Niiden avulla saadaan parannettua tehokerrointa, vähennettyä häviöitä ja jännite pidettyä stabiilina. Kondensaattorin reaktanssi pienenee taajuuden kasvaessa, jolloin suuritaajuiset yliaallot vahvistuvat suhteessa eniten. Yliaallot aiheuttavat kondensaattoreissa lämpenemistä, ylikuormittumista ja häviöitä. Pahimmillaan yliaallot ja kondensaattorit voivat johtaa järjestelmässä resonanssi-ilmiöön, jolloin yliaallot saattavat vahvistua moninkertaisiksi. Resonanssista on kerrottu tarkemmin seuraavassa kappaleessa. Kaikista edellä mainituista ongelmista on seurauksena kondensaattorin eliniän lyhentyminen sekä loistehon kompensoinnin ja suojauksen hankaloituminen.[46]

### 3.4.4 Resonanssit

Kaikkein haitallisin ilmiö yliaaltoihin liittyen on resonanssi. Resonanssi tarkoittaa sähköisessä värähtelypiirissä tilannetta, jossa piirin yli mitatun jännitteen ja piiriin syötetyn virran välinen vaihe-ero on nolla. Resonanssi syntyy, kun jonkin yliaallon taajuus lähestyy verkon resonanssitaajuutta. Resonanssitaajuus syntyy kapasitanssien ja induktanssien välille johonkin verkon osaan. Mikäli verkossa on yliaaltolähteitä lähellä resonanssitaajuutta, saattavat yliaaltovirrat ja jännitteet vahvistua moninkertaisiksi. Resonanssitaajuus voidaan laskea kaavalla:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3.6)$$

missä L on verkon induktanssi ja C kapasitanssi. Resonanssi jaetaan kahteen eri tilanteeseen: sarjaresonanssi ja rinnakkaisresonanssi. [38]

Sarjaresonanssiipiirissä resonanssitaajuudella reaktanssi on lähellä nollaa. Sarjaresonanssiipiiri muodostuu yleensä loistehon kompensointikondensaattorin kapasitanssin ja syöttävän muuntajan induktanssin välille. Resonanssiipiirin taajuus määräytyy kaavan 3.6 mukaisesti. Resonanssitaajuudella muuntajan ja kondensaattorin muodostaman resonanssiipiirin impedanssi on erittäin pieni ja tällöin verkossa esiintyvällä yliaaltovirralla on matalaimpedanssinen sulkeutumisreitti. Tätä ilmiötä käytetään hyväksi yliaaltojen suodattamisessa. Mikäli keskijännitteellä esiintyy harmonisia yliaaltoja lähellä resonanssitaajuutta, ne moninkertaistuvat pienjännitepuolelle.[44]

Rinnakkaisresonanssiipiiri muodostuu esimerkiksi suuntaajan rinnalle kytketyn kondensaattorin tai muuntajan induktanssin välille. Rinnakkaiskompensointia käytettäessä resonanssiipiirin resonanssitaajuus voidaan laskea kaavalla:

$$f_r = f_1 \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}}, \quad (3.7)$$

jossa  $f_r$  on resonanssitaajuus  
 $f_1$  on syöttävän verkon taajuus  
 $S_k$  on verkon oikosulkuteho kondensaattorin kytkentäpisteessä  
 $Q_c$  on kondensaattorin loisteho

Kaavasta 3.7 huomataan, että oikosulkutehon kasvaessa verkon resonanssitaajuus kasvaa ja suurempi osa yliaalloista kulkeutuu syöttävän verkon suuntaan. Verkossa kuormana olevat oikosulkumootorit kasvattavat resonanssitaajuutta, mutta samalla vaimentavat resonansseja. Resistiivinen kuorma vaimentaa resonansseja, mutta itse taajuuteen sillä ei ole vaikutusta. Rinnakkaisresonanssiipiirissä impedanssi on sarjaresonanssiipiiriin verrattuna suuri, joten jännite säröytyy voimakkaasti. Mikäli verkossa on yliaaltokomponentteja lähellä resonanssitaajuutta, resonanssiipiirissä alkaa tällöin kulkea myös suuri virta, jolloin kondensaattori voi ylikuormittua.[38]

### 3.4.5 Muita haittoja

Yliaaltojen aiheuttamat jännitesäröt aiheuttavat haittoja elektroniikkalaitteissa, joiden ohjaus perustuu jännitteen tai virran käyrämuodon nollakohdan tarkkailuun. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi katkaisijat. Yliaallot saattavat aiheuttaa haittaa katkaisijan katkaisukykyyn. Kun särö on suuri, virran nousunopeus nollakohdassa voi olla suurempi kuin puhtaalla siniaallolla, jolloin katkaisu on vaikeampaa. Yliaallot häiritsevät myös tilanteessa, jossa maasulkusuojauksen ja oikosulkusuojauksen releet on yhdistetty. Lisäksi suojauslaitteet, jotka tarkkailevat taajuuden muutoksia ja jännitteen tai virran huippuarvoja, voivat häiriintyä jännitesäröistä. [41]

Yliaallot heikentävät myös järjestelmän tehokerrointa ja ylikuormittavat järjestelmän vaihejohtimia, erityisesti nollajohdinta. Nollajohtimessa ei kulje virtaa symmetrisessä lineaarisessa kolmivaiheisessa kuormituksessa. Mikäli kolmivaiheisessa nelijohtoisisessa

järjestelmässä on paljon epälineaarisia yksivaiheisia kuormia, nollajohdossa voi kulkea kolmas yliaaltovirta. Yliaaltovirran suuruus voi olla vaihevirtaan verrattuna jopa kaksinkertainen. Nollajohdin voi tällöin ylikuumentua ja aiheuttaa tulipalovaaran, sillä nollajohdoissa ei ole sulakkeita.[41]

Mittauslaitteet on yleensä kalibroitu sinimuotoisille arvoille, jolloin säröytyneet arvot voivat aiheuttaa virheitä tuloksissa. Lisäksi viestintäjärjestelmät ovat herkkiä yliaalloille puhe- ja radiotaajuuksilla. Yliaallot voivat indusoida häiriöitä viestintälinjoihin, kun ne ovat sopivalla taajuudella. Häiriön määrä viestintäjärjestelmissä on riippuvainen voimajohtojen sijainnista järjestelmään nähden ja yliaaltojen määrästä. Häiriöiltä vältytään esimerkiksi asentamalla voimajohtot ja viestintäjohtot eri kaapelihyllyille.[41]

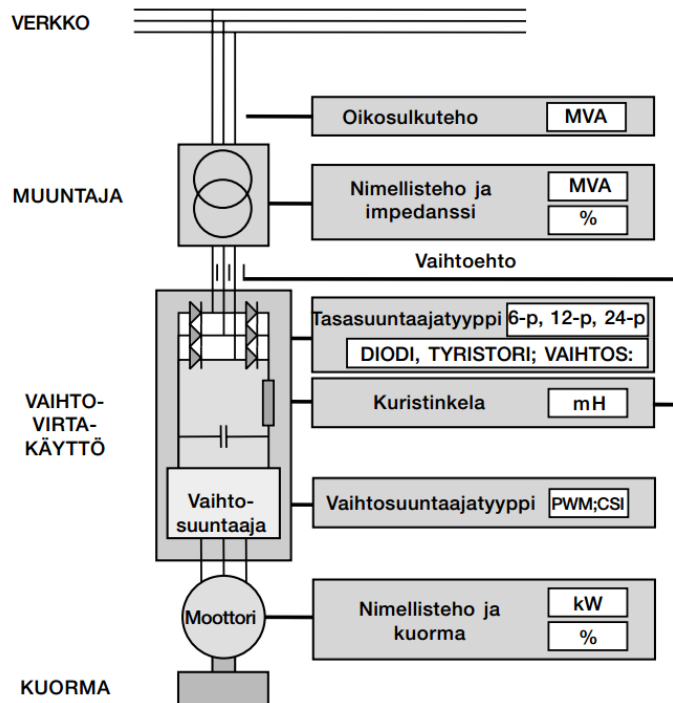
### **3.5 Yliaaltojen torjunta**

Yliaaltoja voidaan torjua joko tekemällä rakenteellisia muutoksia laitteistoon tai käyttämällä ulkoista suodatusta. Yliaaltojen torjunnassa käytetty keino valitaan sen mukaan, kuinka suuri on yliaaltoja tuottavien laitteiden osuus verkon kokonaiskuormaan nähden. Lisäksi standardit ja luokitukset sekä tekniset ja taloudelliset näkökulmat voivat asettaa ehtoja sille, mitä torjuntakeinoa käytetään. Yliaaltopitoisen verkon kompensointi voidaan toteuttaa joko kondensaattoriparistolla, estokelalla varustetulla kondensaattoriparistolla tai suodattimilla. Kondensaattoripariston yliaaltoja suodattava vaikutus on melko vähäinen, joten sen käsittely jää tässä yhteydessä vähäiseksi. Rakenteellisilla keinoilla pystytään vaikuttamaan myös yliaaltojen määrään ja haittavaikutuksiin.

#### **3.5.1 Rakenteelliset keinot**

Rakenteellisia muutoksia ovat esimerkiksi syötön vahvistaminen, suuntaajan pulssiluvun kasvattaminen, säädetyn tasasuuntaajan käyttäminen ja käytön sisäisen suodatuksen parantaminen. Moottorin valinnalla voidaan vaikuttaa esimerkiksi virtayliaaltoihin. Mitä suurempi on moottori ja moottorin kuorma, sitä suuremmat ovat virtayliaallot. Muuntaajan kohdalla taas jänniteyliaallot pienenevät, kun muuntaajan kokoa kasvatetaan ja impedanssia pienennetään. Syötön oikosulkukestoisuuden kasvattamisella pienennetään jänniteyliaaltoja. Tasasuuntaajan rakenteella sekä käytön vaihtovirtasyöttöön tai tasajännitevälipiiriin asennettavalla kuristimella voidaan vähentää merkittävästi yliaaltoja. Mitä suurempi kuristin, sen pienemmät ovat virtayliaallot.[43]

Kuvassa 3.4 on esitetty vielä vaihtovirtakäytön ominaisuudet, joiden avulla voidaan vaikuttaa yliaaltoihin.



**Kuva 3.4.** Vaihtovirtakäytön ominaisuudet, joiden avulla vaikutetaan yliaaltoihin.[43]

Suuntaajan pulssiluvun kasvattamisella voidaan vähentää yliaaltoja, mutta tällöin kustannukset myös kasvavat muun muassa erikoismuuntajan tarpeen vuoksi. Tasasuuntaajan puolijohdekytkimien vaihdolla, esimerkiksi diodeista tyristoreihin, on merkitystä yliaaltojen kannalta. Näistä käytetään myös nimitystä verkkokommutoidut tasasuuntaajat. Tyristori tarvitsee liipaisupulssin siirtyäkseen johtamattomasta tilasta johtavaan tilaan. Tällöin vaihekulmaa, jossa tyristori alkaa johtaa, voidaan viivyttää. Yli 90 asteen viivyttämisellä tasajännitevälipiirin jännitteestä tulee negatiivinen, joka mahdollistaa tehon takaisinsyötön syöttävään verkkoon. Verkkokommutoitujen tasasuuntaajien huonona puolena on niiden heikko tehokerroin ja kommutointihäiriöiden aiheuttaminen syöttöjännitteen aaltomuotoon. IGBT- sillan käyttö tyristorien sijaan mahdollistaa lisäksi tasajännitetason ja tehokertoimen säädön erikseen tehon virtaussuunnasta riippumatta. IGBT- sillan käyttö mahdollistaa lisäksi loistehon tuoton ja rinnakkaisten kuormien yliaaltovirtojen kompensoinnin. Suurin haitta on kuitenkin kallis hinta.[43]

### 3.5.2 Estokelaparistot

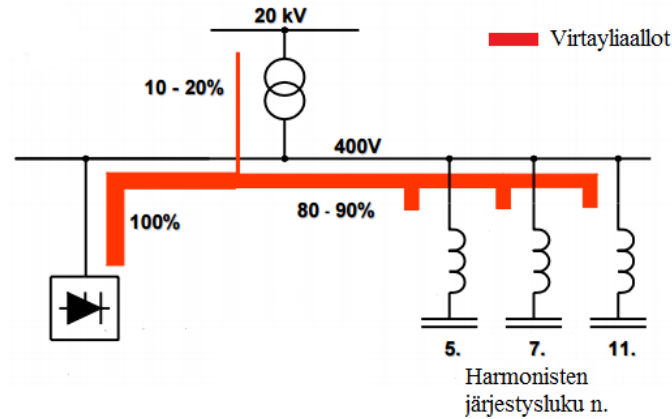
Estokelaparistoratkaisulla vältetään resonanssien syntyminen syöttävän verkon induktanssin ja kondensaattorin kapasitanssin välillä. Estokelaparisto koostuu kondensaattoriyksiköstä ja kuristimesta. Kondensaattori ja kuristin muodostavat sarjaresonanssipiirin, jonka viritystaajuus on pienempi kuin alimman verkossa esiintyvän yliaallon taajuus. Yleisimmin Suomessa käytetyt viritystaajuudet ovat 189 Hz, 141 Hz ja 134 Hz [48]. Estokelapariston yliaaltoja suodattavaan vaikutukseen voidaan vaikuttaa viritystaajuuden valinnalla. Esimerkiksi se suodattaa 10-30 % viidennen yliaaltovirran määrästä, kun käytetään 189 Hz viritystaajuutta. Suodatusvaikutus heikkenee, jos viritystaajuus poikkeaa paljon esiintyvistä yliaaltotaajuuksista. Estokelaparistot toimivat hyvin verkoissa, joissa yliaaltoja esiintyy vähän ja loistehon kulutusta on paljon.[44]

### 3.5.3 Yliaaltosuodattimet

Yliaaltojen vähentämisessä on olennaista pohtia, onko edullisempaa estää niiden syntyminen vai suodattaa niitä. Suodattamisessa on kyse yliaaltojen vähentämisestä, kun yliaaltosärö on lisääntynyt vähitellen. Yliaaltojen suodattimet voidaan jakaa passiivisiin ja aktiivisiin suodattimiin.

Passiivisia suodattimia kutsutaan myös imupiireiksi. Passiivinen suodatin koostuu sarjaan kytketyistä kondensaattorista ja kuristimesta. Imupiirit ovat sarjaresonanssipiirejä, joissa muodostuu tietylle taajuudelle pieni-impedanssinen kulkureitti. Tällöin yliaallolähteen tuottamat yliaallot kulkeutuvat suodattimen kautta eivätkä kulkeudu syöttävään verkkoon. Suodattimien resonanssitaajuus pyritään mitoittamaan mahdollisimman lähellä sen yliaallon taajuutta, joka halutaan poistaa. Viritystaajuuden alapuolella verkko näkee suodattimen kapasitiivisena ja yläpuolella induktiivisena. Perustaajuudella imupiirin impedanssin on suuri, jotta pätötehohäviöt saadaan minimoitua. Lisäksi se toimii perustaajuudella myös loistehon kompensointikondensaattorina. Passiivisia suodattimia voidaan viritellä yhdelle tai monelle taajuudelle, riippuen yliaaltojen määrästä. Monelle taajuudelle viritetty suodatin poistaa eri taajuuksilla olevat yliaallot yhtä aikaa. [38,43]

Kuvassa 3.5 on esitetty verkko, johon on kytketty kolme eri taajuuksille viritettyä passiivisuodatinta.



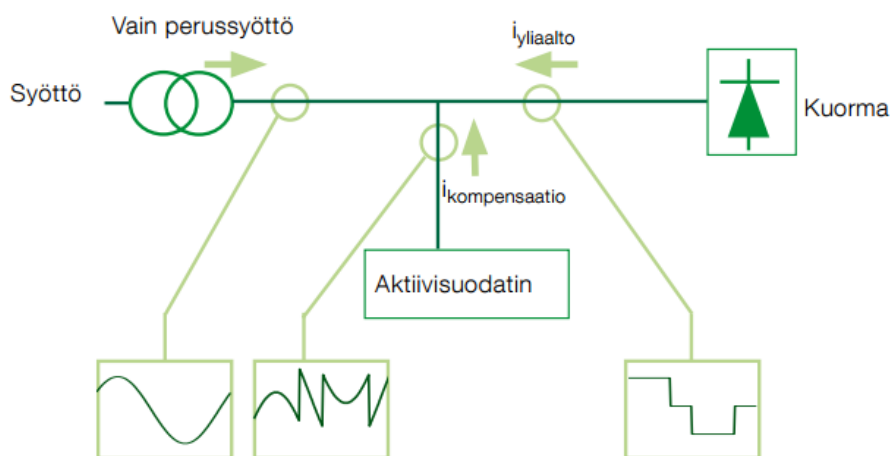
**Kuva 3.5.** Passiivisten suodattimien toimintaperiaate (muokattu lähteestä [44]).

Kytettäessä monta suodatinta rinnan kustannukset kasvavat, jolloin useammalle taajuudelle viritetty suodatin on kannattavampi vaihtoehto häviöidenkin takia. Jos yliaaltoja esiintyy paljon, vaihtoehtona on myös laajakaistainen suodatin. Laajakaistaiset suodattimet vähentävät kaikkia tiettyä taajuutta suurempia yliaaltoja.[38]

Aktiiviset suodattimet ovat tehoelektroniikkakomponenteilla toteutettuja säädettäviä yliaaltovirtalähteitä. Aktiivisuodin kompensoi verkossa esiintyviä yliaaltovirtoja tuottamalla vastakkaisessa vaiheessa olevia virtoja verkon yliaaltovirtoihin nähden, jolloin virrat kumoavat toisensa. Kuormavirran yliaallot poistuvat, kun suodattimen virta ja kuorman virta summautuvat ja tällöin verkkovirrasta tulee lähes sinimuotoinen. [47]



Kuvassa 3.6 on esitetty aktiivisen suodattimen toimintaperiaate.



**Kuva 3.6.** Aktiivisen yliaaltosuodattimen toimintaperiaate.[47]

Uudenaikaisilla aktiivisuodattimilla pystytään suodattamaan jopa 20 harmonista yliaaltoja samanaikaisesti ja yliaallot voidaan valita aina 50 yliaaltoon asti. Aktiivisilla suotimilla pystytään suodattamaan myös muuttuvia yliaaltoja, sillä niiden vaste on hyvin nopea. Lisäksi niiden loistehon kompensointi on portaaton sekä induktiivisilla että kapasitiivisilla kuormilla. Suurin ongelma on kuitenkin korkea hinta. [47]

## 4. NEPLAN OHJELMISTO

Tässä työssä hyödynnetään verkon tarkastelussa ja yliaaltojen laskennassa Neplan-ohjelmistoa. Neplan-ohjelmisto on hankittu Elomaticille hiljattain ja sen käyttö on ollut toistaiseksi vähäistä. Yliaaltotarkasteluja on tehty myös todella vähän kyseisellä ohjelmalla. Neplan on laaja moduulipohjainen ohjelmisto, jonka avulla voidaan mallintaa sähkö-, vesi- tai kaasuverkkoja. Ohjelman on kehittänyt BCP Busarello- yhtiö ja yhtiön pääkonttori sijaitsee Sveitsissä. Neplan hyödyntää lisenssisopimuksia ja ohjelmassa on käytössä rajattu määrä ominaisuuksia riippuen lisenssin laajuudesta. Lisenssisopimuksilla voidaan hankkia lisää työkaluja, kuten esimerkiksi harmonisten tarkastelu tehonjaon lisäksi. Ohjelma vaatii toimiakseen konekohtaisen tai serverillä olevan lisenssiavaimen.[50]

Neplanilla pystytään tarkastelemaan todella isoja verkkoja, koska solmupisteiden määrää ei ole rajoitettu. Graafinen käyttöliittymä mahdollistaa verkkojen mallintamisen kaaviotyypin muotoon, joka helpottaa verkkojen laskentaa ja hahmottamista. Neplanissa on mahdollista valita, minkä standardin mukaan ja millä laskentamenetelmällä laskennat tehdään. Ohjelmassa laskentamenetelmiä on useita, jotta verkostolaskentaa pystyttäisiin tekemään mahdollisimman laajasti. Rajoituksia tulee enemminkin käytettävän tietokoneen muistin kohdalla, mikäli verkko on todella laaja.[50]

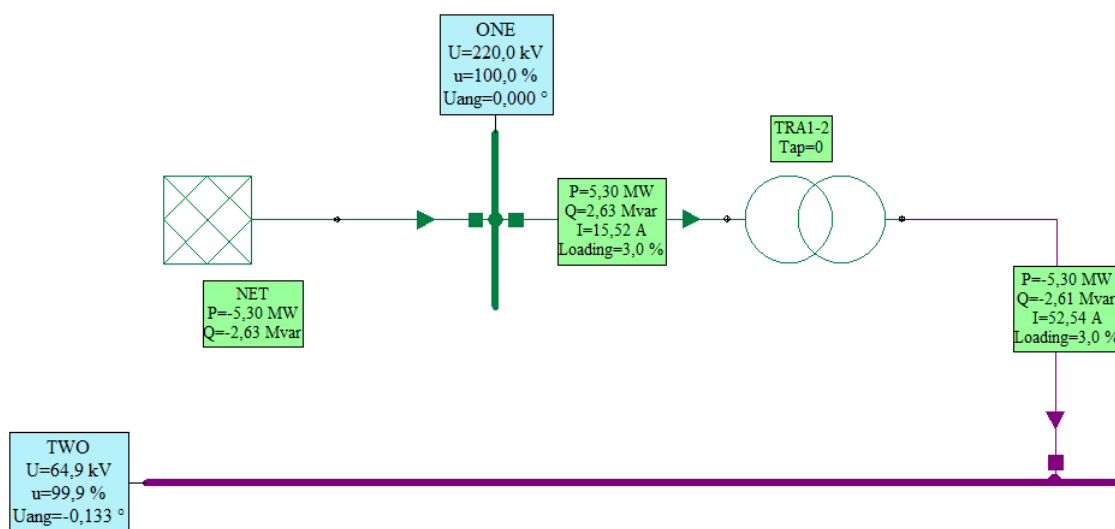
### 4.1 Laskentamoduulit

Verkostolaskenta ja analyysi tehdään Neplanissa graafisesti mallinnetun verkon pohjalta. Kun jokaisen verkon komponentin tiedot ja arvot on sijoitettu ohjelmaan, eri laskentamoduulien avulla voidaan tehdä tarvittavat laskelmat. Neplanissa on useita eri moduuleja, joiden avulla voidaan tehdä muun muassa seuraavia asioita: tehonjako- ja vikavirtalaskelmat, harmoninen analyysi, moottorin käynnistysanalyysi, kaapelin mitoitus, suojasasettelut, luotettavuuslaskelmat ja stabiilisuuslaskelmat. Kunkin moduulin kohdalla voidaan valita, mitä laskentamenetelmää käytetään, mitä arvoja tuloksissa näytetään ja minkä standardin mukaan laskennat tehdään. Elomatic on hankkinut useita erilaisia moduuleja käyttöönsä, joten verkostolaskentaa pystytään tekemään suhteellisen laajasti. Seuraavissa kappaleissa on käsitelty lyhyesti tehonjako- ja vikavirtatarkastelut sekä yliaaltojen tarkastelu Neplan-ohjelmassa.[50]

### 4.1.1 Tehonjakolaskenta

Yksi keskeisin väline verkon suunnittelussa ja sen seurannassa on tehonjaon laskenta. Tehonjaon avulla saadaan tietoa verkon jännitteistä, tehovirtaamista ja siirtohäviöistä tietyssä verkon kytkentä-, kulutus- ja tuotantotilanteessa. Laskennasta saatuja tuloksia voidaan hyödyntää määrittäessä verkon vahvistustarvetta ja investointeja, uusien tuotantolaitosten tarpeen määrittämisessä, kompensointitarpeen selvityksessä ja analysoitaessa jonkin komponentin irtikytkennän vaikutusta verkkoon. Tehonjaon laskenta on perusta myös muille tehtäville tarkasteluille, kuten vikavirtalaskelmille ja harmoniselle analyysille.[51]

Neplanissa tehonjaon ratkaisemisessa eri laskentamenetelmistä voidaan valita Newton Raphson, laajennettu Newton Raphson, virtaiteraatio, jännitteenalenema per vaihe tai DC-tehonjako. Oletuksena ohjelma käyttää laajennettua Newton Raphson menetelmää. Eri komponenteille on määritetty sähköiset arvot ennen laskentaa, jonka perusteella laskenta tehdään. Laskennan tuloksena saadaan pätö- ja loisteho verkon eri osissa sekä solmupisteiden jännitteet. Tulokset voidaan esittää taulukoissa, jotka voidaan siirtää tarvittaessa taulukkotyökaluun muokattavaksi. Tämän lisäksi tulokset ovat nähtävillä myös graafisesti verkkomallissa. Kuvassa 4.1 on esimerkki, miten Neplanissa tehonjaon tulos näkyy graafisesti suoraan verkkomallissa.



**Kuva 4.1.** Tehonjaon tulos Neplanissa.

Ohjelmassa pystyy myös laskennan aikana säätämään verkon eri komponentteja helposti. Esimerkiksi katkaisijat ja erottimet voidaan olettaa häviöttömiksi ja ne voidaan sulkea tai aukaista milloin tahansa. Ohjelma pystyy myös tarvittaessa tasapainottamaan kuormituksia käytettävissä olevan kapasiteetin mukaan.

### 4.1.2 Vikavirtalaskenta

Erilaisten vikatilanteiden tarkasteluun ja vikavirtojen selvittämiseen Neplan tarjoaa oikosulkumoduulin. Moduulin avulla voidaan selvittää vikavirrat kolmivaiheisessa ja kaksivaiheisessa oikosulussa sekä yksi- ja kaksivaiheisen maasulun vikavirrat. Laskenta perustuu johonkin tiettyyn standardiin ja siihen liittyviin laskentamenetelmiin. Esimerkiksi laivasähköverkon tarkasteluun on käytössä standardi IEC 61363-1. Muita standardeja ovat IEC 60909 ja ANSI C37.010/C37.13 ja DC verkolle IEC 61660. Ohjelmassa pystyy melko vapaasti kuvaamaan vian ja muuttamaan vian tyyppiä, kestoja sekä sen ilmenemispaiikkaa. Lähtökohtaisesti vika tehdään johonkin solmuun, kiskoon tai näitä yhdistävään johtoon. Tulokset vikavirroista ovat valittavissa ja ne ilmestyvät sekä rakennettuun verkkomalliin että taulukoihin. Vikavirtalaskelmien pohjalta voidaan releiden ja muiden suojauslaitteiden asettelut muokata niin, että ne toimivat selektiivisesti. Ohjelmassa on mahdollista myös tulostaa ja muokata eri suojauslaitteiden selektiivisyyteen liittyviä toiminta-aikakäyriä. [51]

### 4.1.3 Yliaaltolaskenta

Neplan-ohjelmiston avulla voidaan tutkia verkossa esiintyvien yliaaltojen vaikutuksia verkon virtaan ja jännitteeseen. Tämän lisäksi voidaan laskea harmonisten yliaaltojen aiheuttamia häviöitä verkossa ja yliaaltojen teho. Eri yliaaltotaajuuksia voidaan tarkastella lähes rajattomasti. Tulokset jännitteen ja virran kokonaissäröstä (THD) voidaan laskea missä tahansa verkon pisteessä ja komponentissa. Verkon impedanssista saadaan myös tietoa taajuuden vaihdellessa ja ohjelmasta voidaan tulostaa käyrä, joka kuvaa impedanssin ja taajuuden suhdetta. Analyysin tulokset voidaan esittää spektriesityksenä tai käyrinä aikatasossa ja tulokset on nähtävissä myös taulukoissa.

ABS määrittelee hyvälle yliaaltojen simulointi-ohjelmalle muutamia ominaisuuksia, jotka tekevät ohjelmasta hyvän simulointityökalun. Näitä ominaisuuksia ovat muun muassa:

- i) Mahdollista simuloida laajaa verkkoa suuren solmupistemäärän ansiosta.
- ii) Samanaikainen harmonisten virtojen ja jännitesärön tutkiminen usealla erityyppisellä epälineaarilla kuormituksella.
- iii) Mahdollista tutkia harmonisia sekä myötä-, vasta- että nollaverkossa.
- iv) Mahdollista esittää taajuusvastekäyriä ja tätä kautta etsiä mahdollisia resonanssipisteitä.
- v) Laaja kirjasto erilaisille epälineaarille kuormille sekä suodattimille.
- vi) Jännitteen ja virran esittäminen käyrämuotona aikatasossa sekä spektriesityksenä aina järjestysluvultaan 50 yliaaltoon asti.
- vii) Tulokset helppo ymmärtää ja raportoida [52].

Yliaaltojen lähteiden tuottamat yliaallot voidaan syöttää suoraa graafiseen esitykseen. Ohjelmassa jokin kuorma voidaan siis määritellä yliaaltoja tuottavaksi lähteeksi ja valita, mitä yliaaltoja se syöttää. Verkkoon voidaan myös lisätä erikseen virtalähde, joka syöttää yliaaltoja. Yliaaltojen määriä ja suuruuksia voidaan muokata käsin tai luoda valmiita kirjastoja näitä varten. Ohjelmassa on jonkin verran olemassa myös valmiita kirjastoja esimerkiksi 6- tai 12- pulssisille tasasuuntaajille. Yliaaltojen laskenta käydään tarkemmin läpi kappaleessa 6.1. Neplanin avulla voidaan myös mitoittaa suodattimien suuruudet. Verkkomalliin lisätään tarvittavat suodattimet, esimerkiksi RLC- imupiiri, ja tulosten perusteella mitoitetaan suodatin. [51]

## 4.2 Ohjelman käyttö

Jotta ohjelman avulla voidaan tarkastella jotakin haluttua verkkoa, pitää siitä muodostaa malli, joka sisältää kaikki komponentit lähtötietoineen. Tämän jälkeen laskentamoduulien avulla voidaan suorittaa halutut tarkastelut. Verkkojen mallintaminen lähtee liikkeelle uuden projektin aloittamisesta, johon verkkomalli luodaan. Verkko mallinnetaan valmiiden kirjastojen avulla, jotka sisältävät suuren määrän erilaisia verkon komponentteja. Liitteessä 1 on esitetty Neplanin käyttöliittymä ja komponentit ovat valittavissa ikkunan oikeasta laidasta. Komponentit siirretään piirtoalueelle ja niille syötetään tarvittavat lähtötiedot.

Ohjelmassa verkko mallinnetaan projektin sisällä olevaan diagrammiin. Samaan projektiin voidaan luoda useampi diagrammi, joka on hyödyllistä suurempien verkkojen tarkastelussa. Esimerkiksi isommasta verkosta voidaan luoda omat diagrammit kaikille eri alakeskuksille, jolloin verkon hallinta ja tarkastelu on huomattavasti helpompaa ja tarkempaa. Piirtoalue sekä solmupisteiden määrä ovat myös rajalliset (riippuen lisenssin laajuudesta), jolloin diagrammeihin jako on myös tästä näkökulmasta järkevää. Diagrammien hallintatyökalu sekä lista eri diagrammeista ovat nähtävissä liitteen 1 käyttöliittymäikkunan vasemmassa laidassa. Ohjelma kuvaa myös eri jännitetasot eri väreillä, mikä helpottaa verkon hahmottamista. Verkon eri osia voidaan myös värjätä halutunlaisiksi esimerkiksi suojausalueiden mukaan. Kun verkko on valmis komponenttien ja lähtötietojen osalta, voidaan aloittaa verkostolaskenta käytettävissä olevien moduulien avulla.

Ohjelman käyttöönotto on helppoa, sillä se noudattaa suurimmaksi osin Windows käyttöjärjestelmän periaatteita. Myös ulkonäöltään ohjelma on hyvin samankaltainen kuin Windows- ohjelmat. Itse verkon piirtäminen on myös melko helppoa ja sujuu nopeasti lyhyenkin perehtymisen jälkeen. Jos käyttäjällä on aiempaa kokemusta muista vastaavista ohjelmistoista, ei Neplanin käyttö tuota suuria ongelmia. Joitain ongelmia tulee komponenttien yhteenliitettävyyden kanssa. Ohjelma vaatii esimerkiksi, että komponentit ovat samassa jännitetasossa. Lisäksi komponenttien liitoskohdissa pitää käyttää solmupisteitä, mikä saattaa hankaloittaa ja hidastaa piirtämistä. Kun mallinnetaan suurta verkkoa, solmupisteraja tulee vastaan todella nopeasti. Tämän takia verkkoa joudutaan

pilkkomaan eri diagrammeihin. Ohjelma saattaa myös rajoittaa komponentin liittämistä verkkoon, ellei sille ole ensin mallinnettu johtoa.

Ohjelmaan pystyy syöttämään suhteellisen paljon erilaisia tietoja ja sähköisiä arvoja komponenteista, mikä saattaa muodostua ongelmaksi. Yleensä verkon eri komponenttien laitekortit saattavat olla todella monisivuisia ja oikean tiedon löytäminen ja sijoittaminen ohjelmaan on työlästä. Ohjelma sisältää paljon eri laskentamoduuleja ja tämän takia komponenttien tietoihin pystyy syöttämään paljon erilaisia arvoja. Tärkeintä olisi löytää oikeat lähtötiedot kuhunkin eri laskentatilanteeseen ja tämän takia sähköalan tuntemus ohjelmaa käytettäessä korostuu. Ohjelma laskee tuloksia vähäisilläkin lähtötiedoilla, mutta tulosten oikeellisuus saattaa olla kyseenalainen. Ohjelman Help-valikko on kuitenkin melko kattava ja tieto eri symboleista ja suureista on löydettävissä nopeasti.

Laskentamoduulien käyttö onnistuu helposti työkalurivistöltä löytyvän valikon kautta. Kun laskentamoduuli on valittu, ohjelma tekee analyysin verkosta ja tulokset ovat nähtävissä suoraan verkkokuvassa tai taulukoissa. Asetuksista voidaan valita, mitä arvoja halutaan nähdä. Laskentamoduulien asetuksia määritettäessä pitää olla hyvä sähköalan tuntemus, jotta laskennan tulokset vastaavat oikeita arvoja. Laskennan perusasetukset kannattaa säätää valmiiksi ja sen jälkeen myös hieman vähemmän kokemusta laskennan periaatteista omaava henkilö pystyy tekemään laskelmia. Ohjelman yksi suurimmista hyödyistä on verkkomallin muunneltavuus ja päivitettävyyys. Verkkoa pystytään muokkaamaan vaivattomasti kesken laskelmien ja eri laskelmia pystytään tekemään todella nopeasti. Yrityksen kannalta ohjelma on hyvä, sillä sen peruskäyttö on helposti opittavissa ja opetusmateriaalia ohjelmiston kehittäjän suunnalta on tarjolla. Ohjelmaa pystyy opettelemaan itsenäisesti varsin hyvin, mikäli tietokoneen käyttö ja perustiedot verkostolaskennasta ovat hallussa.

## 5. MALLIVERKKO

Tässä työssä tarkasteltiin Kaspianmerellä toimivan Dada Gorgud-nimisen öljynporauslautan sähköverkkoa. Öljynporauslautan sähköverkon rakenne muistuttaa hyvin paljon laivan sähköverkkoa ja lautta oli ajankohtainen projekti myös yritykselle. Dada Gorgud on rakennettu vuonna 1978 Rauma Repola Oy:n toimesta Mäntyluodon telakalla Porissa. Lautan toiminta keskittyy nykyään Kaspianmerelle ja lautan omistaa Caspian Drilling Company. Lautta on noin 66 m pitkä ja 62 m leveä ja siinä on asuintilaa 120 hengelle.

Lauttaan tehtiin mittava korjaustyö vuonna 2015 ja sen sähköverkko uudistui myös tämän myötä. Seuraavissa kappaleissa on käsitelty Dada Gorgudin sähköverkon rakenne ja sähköjakelu sekä kuvattu lyhyesti verkon pääkomponentit tarkasteltavan verkon osalta. Dadan verkosta on rakennettu malli Neplan-ohjelmistolla ja kappaleessa 6 verkon yhteen osaan suoritetaan yliaaltolaskelmat kyseisellä ohjelmalla.

### 5.1 Sähkönjakelu ja -tuotanto

Lautan sähköverkon rakenne on suhteellisen yksinkertainen ja liitteessä 2 on esitetty verkon yksinkertaistettu rakenne yksiviivadiagrammina. Liitteen 2 diagrammi on piirretty AutoCAD ohjelmistolla. Lautassa on käytössä kaiken kaikkiaan kolme eri jännitetasoa sekä yksi 230 V UPS- jakelu:

- 690 V, 3-vaihe, ei nollajohdinta
- 380 V, 3-vaihe, ei nollajohdinta
- 230 V, 3 vaihe, ei nollajohdinta
- 230 V, UPS- sähkönjakelu, ei nollajohdinta

Verkon taajuus on 50 Hz ja luokituslaitoksena toimii ABS (engl. American Bureau of Shipping). Luokituslaitoksen mukaan taajuuden heilahtelu saa olla vakaassa tilanteessa (engl. steady state)  $\pm 5\%$  ja transienttitilanteessa  $\pm 10\%$ . Vastaavasti jännitteenvaihtelu saa olla vakaassa tilassa  $\pm 2,5\%$  ja transienttitilanteessa  $-15\%$  ja  $+20\%$  välillä edellä listatuista jännitteistä.

Lautan neljä päägeneraattoria syöttävät 690 V päätaulua (MS1). Päätaulu on jaettu kahden osaan BUS 1 ja BUS 2, jotka on erotettu katkaisijalla. Katkaisija on normaalitilanteessa aina kiinni, mutta esimerkiksi huoltotoimenpiteiden takia se voidaan avata ja erottaa kiskot toisistaan. 690 V verkon molemmista osista lähtevät syötöt muuntajien T1 ja T2 välityksellä 380 V verkkoon (MS2) ja sieltä edelleen T3 ja T4 muuntajien välityk-

sellä 230 V verkkoon (MS3). MS2 ja MS3 taulut on myös jaettu katkaisijan välityksellä kahteen osaan (BUS 1 ja BUS 2) ja katkaisijat ovat auki normaalitilanteessa. Katkaisijat ovat kiinni ainoastaan silloin, kun jokin muuntajista ei ole käytössä esimerkiksi huollon tai vian takia. 380 V jännitteellä olevaa hätätaulua ES1 syötetään normaalitilanteessa MS2 taulusta ja hätätilanteessa hätägeneraattorin avulla. ES1 syöttää puolestaan 230 V hätätaulua ES2 kahden muuntajan T5 ja T6 välityksellä.

Sähköenergian tuotanto tapahtuu lautassa neljän päägeneraattorin avulla. Generaattoreita pyörittää neljä dieselmoottoria ja lautan pitää pystyä toimimaan täydellä teholla myös pelkästään kolmella generaattorilla. Lisäksi lautassa on yksi hätägeneraattori. Alla olevaan taulukkoon on koottu tekniset tiedot generaattoreista.

*Taulukko 5.1. Generaattoreiden parametrit.*

	$U_r(\text{kV})$	$S_r(\text{MVA})$	$P_r(\text{MW})$	$\cos\phi$	$x_d \text{ sat.}(\%)$	$x_d' \text{ sat.}(\%)$	$x_d'' \text{ sat.}(\%)$	$x_2(\%)$	$x_0(\%)$
<b>GEN1</b>	0,69	3,3	2,64	0,8	264,2	18,3	11,4	11	7
<b>GEN2</b>	0,69	3,3	2,64	0,8	264,2	18,3	11,4	11	7
<b>GEN3</b>	0,69	3,3	2,64	0,8	264,2	18,3	11,4	11	7
<b>GEN4</b>	0,69	3,3	2,64	0,8	264,2	18,3	11,4	11	7
<b>EM.GEN</b>	0,38	1,74	1,39	0,8	-	18,3	11,4	11	-

Päätauluun MS1 voidaan syöttää sähkötehoa väliaikaisesti myös rannasta. Tämä syöttö on merkitty liitteen 2 diagrammiin SHORE POWER 690V AC- tunnuksella. Tätä kytkentää käytetään, kun halutaan käyttää lautan nosturia rannassa. Myös 380 V taulua MS2 voidaan syöttää rannasta, joka näkyy liitteessä 2 SHORE POWER 380V AC- tunnuksella. Tätä kytkentää käytetään rannassa syöttämään esimerkiksi lautan asuintiloja.

Tässä työssä tarkastellaan yliaaltoja 690 V verkon osalta ja ainoastaan MS1 päätaulun toista puoliskoa (BUS 1). Suurimmat yliaaltolähteet on kytketty päätauluun ja päätaulun molemmat puoliskot ovat lähes identtiset kuormituksen ja komponenttien osalta. Lisäksi ohjelmiston käytettävyyttä tutkittaessa tämä on riittävän kokoinen verkon osa tarkastelua varten. Seuraavassa kappaleessa käsitellään komponentit ja kuormitukset ainoastaan BUS 1 puoliskosta.



## 5.2 Verkon komponentit ja kulutus

Lautassa on käytössä eri kuormituksia käyttötilanteesta riippuen. Lähtökohtaisesti lautta toimii kolmessa erilaisessa tilanteessa: poraus, poran nosto ja pora jumissa. Lauttaan on laskettu tehonjako kaikille eri tilanteille. Tässä työssä tarkastellaan tilannetta, jolloin porataan. Porauksen yhteydessä suurimmat yliaaltoja tuottavat lähteet ovat käytössä, joten yliaaltojen tarkastelu on hyvä tehdä tässä tilanteessa.

Liitteessä 3 on esitetty tässä työssä tarkasteltava verkko eli päätaulun MS1 toinen puolisko BUS 1. Kyseinen kuva on mallinnettu Neplan-ohjelmalla ja kuvassa vihreällä pohjalla olevat otsikot kuvaavat eri komponentteja. Vaaleansinisellä pohjalla olevat tekstit näyttävät komponentin lisäksi jännitteen suuruuden. Taulukossa 5.2 on esitetty BUS 1 kiskon DC-kuormat ja niiden nimellistehot ( $P_r$ ) sekä tehot porauksen aikana ( $P_a$ ). Jos porauksen aikana oleva sarake on nolla, komponentti ei ole tällöin käytössä porauksen aikana.

**Taulukko 5.2** Kiskon BUS 1 DC-kuormien nimellistehot ja pätötehot porauksen aikana.

	$P_r$ (kW)	Poraus $P_a$ (kW)
DWA	888	0
DWB	888	0
MP1A	705	423
MP1B	705	423
Rotary Table	888	0
Yht.	4074	846

Taulukossa 5.2 ensimmäisenä olevat kuormat DWA ja DWB ovat moottoreita, jotka osallistuvat poran nostoon ja laskuun. Lautassa käytettävät mutapumput MP1A ja MP1B huolehtivat porauksen aikana mudan ja lietteen pumppauksesta ja kierrätyksestä. ”Rotary Table” kuvaa pyöröpöytää, jota pyörittää DC-moottori.

Taulukkoon 5.3 on merkitty AC-kuormat porauksen aikana. MS1 BUS 1 kiskosta menee T1 muuntajan kautta syöttö 380 V verkon BUS 1 kiskoon, joka näkyy mallissa BUS 1 0,38 kV nimisenä solmupisteenä. Tämän puolen verkkoa ei kuitenkaan tutkita, joten kyseiseen solmupisteeseen lisättiin T1 LOAD niminen kuormitus kuvaamaan loppuverkon kuormaa porauksen aikana. Lautassa on järjestelmä, jonka avulla merivedestä voidaan tehdä makeaa vettä ja tämä kuorma on merkitty verkkoon ”W.M. Heater” nimellä. HPU 1 ja HPU 2 (engl. Hydraulic Power Unit) ovat hydraulisiin venttiiliohjauksiin liittyvät komponentit ja ”Chiller Unit 1” on konehuoneen ja sähkötilojen jäähdytin.

**Taulukko 5.3** Kiskon BUS 1 AC-kuormien nimellistehot, tehokertoimet ja pätötehot porauksen aikana.

	$S_r$ (kVA)	$P_r$ (kW)	$\cos\phi$	Poraus $P_a$ (kW)
T1 LOAD	3167	2724	0,86	952
W.M. Heater	300	300	1	150,0
HPU 1	109	88	0,85	26,4
HPU 2	109	88	0,85	26,4
Chiller Unit 1	198	160	0,85	128,0
Yht.	3883	3360		1282,8

Kiskossa BUS 1 olevan muuntajan T1 tekniset tiedot on kerätty taulukkoon 5.4 valmistajan datalehdeltä. Taulukossa  $S_r$  on muuntajan nimellisteho,  $U_{r1}$  ja  $U_{r2}$  ensiö- ja toisio- puolen jännitteet,  $P_{kn}$  nimelliskuormitushäviöt,  $P_{fe}$  tyhjäkäyntihäviöt,  $u_k$  oikosulkuimpedanssi ja  $I_{r1}$  on ensiön nimellisvirta.

**Taulukko 5.4.** Muuntajan tekniset tiedot.

	$S_r$ (kVA)	$U_{r1}$ (V)	$U_{r2}$ (V)	$P_{kn}$ (W)	$P_{fe}$ (W)	KytKentä	$u_k$ (%)	$I_{r1}$ (A)
T1	2000	690	380	11500	4000	Dyn11	5	1673,48

Verkosta löytyy kaiken kaikkiaan viisi tasasuuntaajaa (CONV), jotka syöttävät erilaisia tasavirtamoottoreita. Tasasuuntaajan eteen on kytketty lisäksi kuristin (REAC), jonka tarkoituksena on vähentää yliaaltojen määrää. Kaikki tasasuuntaajat ovat keskenään samanlaisia ja niiden ohjaus tapahtuu jännitteen ja kulman avulla. Yksittäisen tasasuuntaajan tiedot on koottu taulukkoon 5.5.

**Taulukko 5.5.** Yksittäisen tasasuuntaajan tekniset tiedot.

	Tyyppi	$U_{set}$ (V)	Siltojen lkm.	$\theta$ (°)	$\theta_{min}$ (°)	$\theta_{max}$ (°)	$X_c$ (Ω)	$R_{loss}$ (Ω)
CONV	Pos.napa	720	1	6	5	40	0,1	0,01

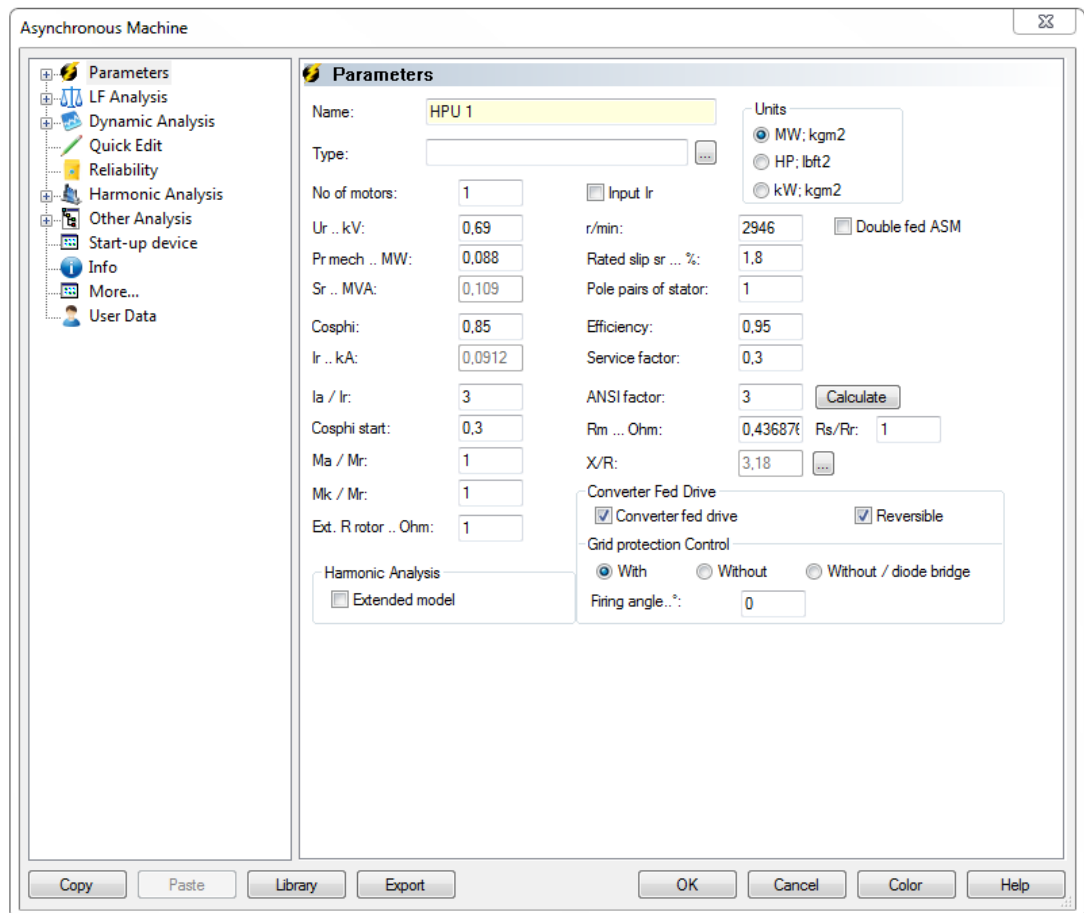
Taulukossa 5.5 tyyppi kertoo tasasuuntaajan napaisuuden (joko positiivinen tai negatiivinen),  $U_{set}$  kuvaa ohjausjännitettä, siltojen lukumäärä kuvaa kolmivaihetasasuuntaussiltojen määrää sarjassa,  $\theta$  on sytytyskulman suuruus,  $X_c$  on kommutointireaktanssi ja  $R_{loss}$  kuvaa häviöiden määrää.

## 6. YLIAALTOJEN LASKENTA JA TULOKSET

Tässä kappaleessa tarkastellaan yliaaltojen vaikutusta öljynporauslautan 690 V BUS 1 verkkoon ja miten kyseinen tarkastelu suoritetaan Neplan ohjelmistolla. Aluksi on selvitetty ohjelman asetuksia yliaaltotarkastelun näkökulmasta ja tämän jälkeen esitetään tulokset ilman yliaaltosuodattimia ja yliaaltosuodattimien kanssa.

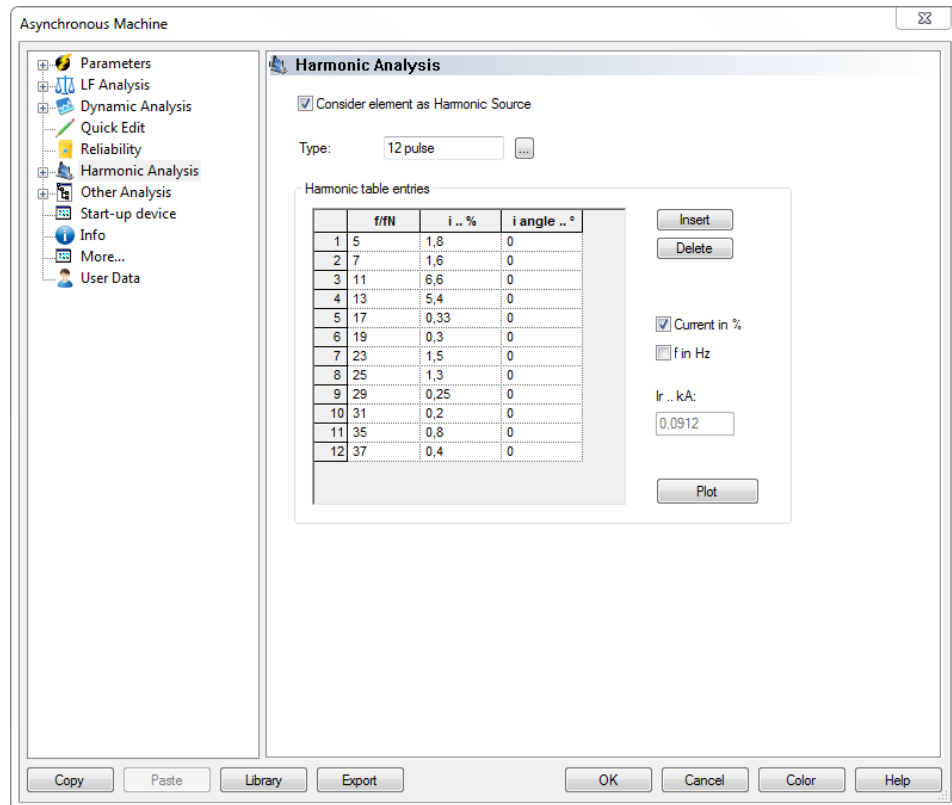
### 6.1 Ohjelman asetukset

Jotta Neplan-ohjelmistolla voidaan tarkastella yliaaltojen vaikutuksia tarkasteltavassa verkossa, verkkoon pitää määrittää yliaaltoja tuottavat lähteet ja tuotettujen yliaaltojen suuruudet. Yliaaltojen lähteiden määrittämiseen voidaan käyttää kahta eri tapaa, kun yliaaltojen suuruudet jonkin tietyn komponentin osalta on tiedossa. Kyseiset tiedot saadaan joko komponenttien valmistajalta tai niissä voidaan käyttää teoreettisia arvoja. Ensimmäinen vaihtoehto on määrittää yliaaltojen määrä suoraan jonkin komponentin tietoihin. Tämä voidaan tehdä, kun kyseessä on esimerkiksi ihan tavallinen kuormituspiste tai vaihtovirtamoottori. Kuvassa 6.1 on esitetty esimerkiksi kuorman HPU 1 aloitusvalikko, jossa pääsee määrittämään parametreja kyseiselle komponentille. Kyseessä on siis vaihtovirtamoottori ja tälle voidaan määrittää suhteellisen paljon erilaisia lähtötietoja.



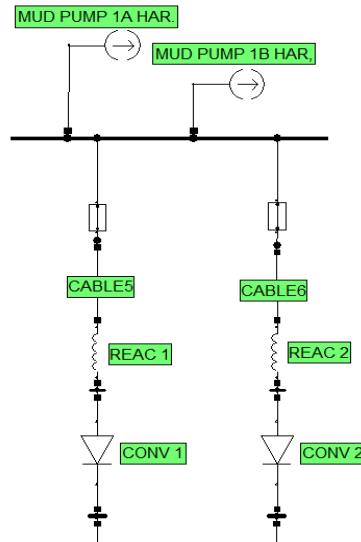
**Kuva 6.1.** Kuorman HPU 1 aloitusvalikko.

Kuvan 6.1 ikkunan vasemmasta laidasta löytyy erilaisia välilehtiä ja yksi niistä on harmoninen analyysi. Kun kyseisen välilehden avaa, avautuu kuvan 6.2 mukainen valikko. Kuvassa 6.2 valitaan kuorma yliaaltolähteeksi ”Consider element as Harmonic Source”-kohdasta, jolloin lähteelle voidaan määrittää yliaaltosisältö. Esimerkiksi kuvassa 6.2 lähteen yliaaltosisällöksi on valittu valmiista kirjastosta 12-pulssinen suuntaaja ja tällöin esimerkiksi 5. yliaallon osuus on 1,8 %, 7. yliaallon osuus 1,6 % ja niin edelleen. Virta- ja taajuusarvot voidaan antaa suhteellisina tai arvot voidaan syöttää suoraan ampeerina tai herzeinä. Tämä voidaan valita ”Current in %” tai ”f in Hz” kohdasta. Lisäksi Plot-painikkeesta voidaan tarkastella säröytyneen virran käyrämuotoa. Yliaaltosisältöä voidaan muokata myös suoraan taulukkoon ja asettaa yliaaltojen määrä ja suuruus halutunlaiseksi.



**Kuva 6.2** Kuorman yliaaltosisällön määrittäminen.

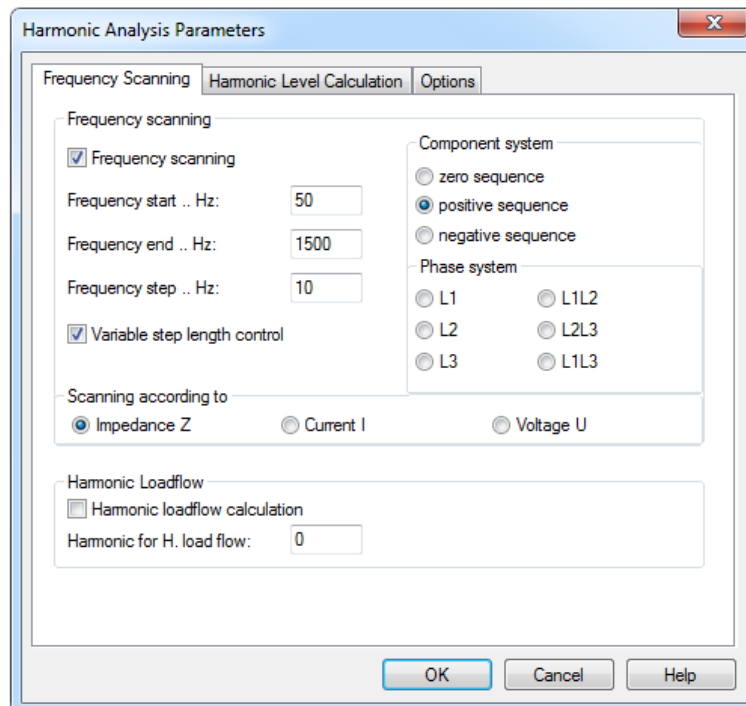
Toinen vaihtoehto yliaaltolähteiden määrittämiseksi on lisätä verkkoon erillisiä virtalähteitä. Ohjelmassa ei pysty esimerkiksi tasasuuntaajien parametreja määrittettäessä tekemään tasasuuntaajasta yliaaltojen lähdettä samalla tavalla kuin kuvassa 6.2 vaihtovirtamoottorin kohdalla. Kyseistä valikkoa ei ole olemassa tasasuuntaaja- komponentissa valmiina eikä myöskään muuntajassa. Tämän takia helpoin tapa on luoda virtalähde verkkoon, joka syöttää esimerkiksi tasasuuntaajalle tyypillisiä tai teoreettisia yliaaltoja verkkoon. Kuvassa 6.3 on nähtävillä tällainen kytkentä, joka tehdään myös tarkasteltavaan verkkoon.



**Kuva 6.3.** Yliaaltolähteet virtalähteinä.

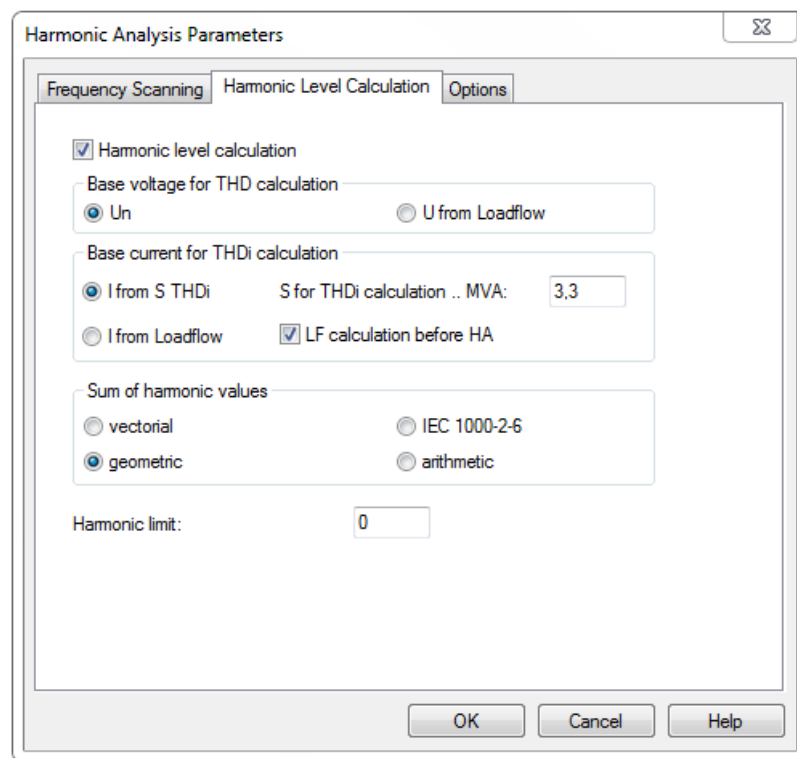
Avattaessa virtalähteen alkuvalikko, avautuu vastaavanlainen näkymä, kuin kuvassa 6.2. Kun tasasuuntaajien yliaaltosisältö tiedetään, voidaan kyseiset arvot syöttää virtalähteisiin, jolloin tasasuuntaajien yliaallot tulevat huomioiduksi laskelmissa.

Kun verkon eri yliaaltolähteet on määritetty ja lisätty verkkomalliin, harmoninen analyysi- moduuliin määritetään laskentaa varten erilaisia asetuksia ja parametreja. Kuvassa 6.4 on esitetty aloitusvalikko harmoniselle analyysille.



**Kuva 6.4.** Harmoninen analyysi- moduulin asetukset.

Kuvan 6.4 valikossa voidaan määrittää, mistä taajuudesta alkaen laskenta tehdään ja kuinka suurella askeleella taajuutta muunnellaan. Vaihtoehtoisesti voidaan valita myös kohta ”Variable step length control”, jolloin ohjelma säättää automaattisesti askeleen suuruutta laskennan aikana. Tämän jälkeen valitaan, tehdäänkö laskenta impedanssin, virran vai jännitteen mukaan. Lopuksi valitaan vielä, tehdäänkö laskenta myötä-, vastavai nollaverkossa. Ohjelmassa on mahdollista laskea myös eri yliaaltojen tehonjako. Esimerkiksi ”Harmonic for H. load flow”- kohtaan voidaan laittaa numero 5, jolloin ohjelma laskee 5. yliaallon tehonjaon verkossa. Kuvassa 6.5 on esitetty ”Harmonic Level Calculation”- välilehden valikkonäkymä.



**Kuva 6.5.** Harmoninen analyysi- valikon toinen välilehti.

Jännite- ja virtasärön laskemiseksi ohjelmaan syötetään perusjännite  $U_1$  ja perusvirta  $I_1$ , johon eritaajuisia jännite- ja virtakomponentteja verrataan. Jännitteen kohdalla voidaan valita joko nimellisjännite verkossa tai tehonjaon tuloksena saatu jännite. Vastaavasti virran perusarvoksi voidaan valita tehonjaon mukainen virta tai näennäistehon  $S$  ja jännitteen kautta laskettu virta. Perustehoksi  $S$  valittiin generaattoreiden nimellisteho 3,3 MVA. Harmonisten summan laskentamenetelmä valitaan ”Sum of harmonic values” kohdasta.

Taulukossa 6.1 on esitetty eri tavat laskea harmonisia yhteen, joita ohjelmassa on käytössä.

*Taulukko 6.1. Vaihtoehdot harmonisten summan laskemiseksi.*

Menetelmä	Kaava
Vectorical	$U_h = U_{h1} + U_{h2} + U_{h3} + U_{h4} + \dots$
Geometric	$U_h = \sqrt{U_{h1}^2 + U_{h2}^2 + U_{h3}^2 + U_{h4}^2 + \dots}$
IEC-1000-2-6	$U_h = k_1 \cdot  U_{h1}  + k_2 \cdot  U_{h2}  + k_3 \cdot  U_{h3}  + k_4 \cdot  U_{h4}  + \dots$
Arithmetic	$U_h =  U_{h1}  +  U_{h2}  +  U_{h3}  +  U_{h4} $

Vektorinen summa on matemaattisesti oikein tapa laskea, mutta käytännössä harmonisten komponenttien kulma ei ole välttämättä tiedossa, jolloin geometrinen laskentatapa saattaa olla parempi. Geometrinen summa antaa pienimmän arvon ja aritmeettinen summa taas korkeimman arvon. ”Options”-välilehdeltä valitaan vielä lopuksi, mitkä solmupisteet ja komponentit otetaan laskentaan mukaan.

## 6.2 Verkko ilman yliaaltosuodattimia

Tässä kappaleessa esitetään verkon tila ja tulokset harmonisista yliaalloista ilman yliaaltosuodattimia ja kompensointia. Verkossa suurimmat yliaaltojen lähteet ovat mutapumppujen tasasuuntaajat. Ensimmäisenä näiden tasasuuntaajien yliaaltojen määrä ja suuruus pitää arvioida ja lisätä ne verkkomalliin. Tasasuuntaajien aiheuttamat yliaallot mallinnetaan verkkoon virtalähteinä, kuten kuvassa 6.3 on tehty.

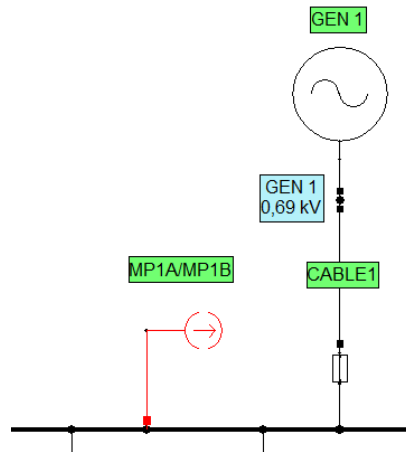
Mutapumppujen tasasuuntaajien CONV 1 ja CONV 2 aiheuttamat harmoniset yliaaltovirrat on esitetty taulukossa 6.2.

*Taulukko 6.2. Mutapumppujen tasasuuntaajien harmoniset yliaaltovirrat.*

Kuorma	$I_m$ (A)	Harmoniset virrat (A)			
		5. 28%	7. 5%	11. 9%	13. 4%
CONV 1	588	164,64	29,4	52,92	23,52
CONV 2	588	164,64	29,4	52,92	23,52
Yht.		329,28	58,8	105,84	47,04



Tasasuuntaajien tuottamien yliaaltojen suuruudet ja määrät on saatu valmistajalta. Neplan malliin mutapumppujen tasasuuntaajien aiheuttamat yliaallot on mallinnettu yhdeksi virtalähteeksi (MP1A/MP1B), joka sisältää näiden kahden tasasuuntaajan tuottamat yliaallot yhteensä. Kuvassa 6.6 on vielä havainnollistettu kytkentää.



**Kuva 6.6.** Tasasuuntaajien yliaaltoja mallintava lähde MP1A/MP1B.

Muuntajan ja oikosulkumootoreiden tuottamia yliaaltoja ei tässä kohtaa huomioida, sillä ne ovat tasasuuntaajiin verrattuna vähäisiä. Kun yliaaltolähteet on määritetty verkkoon ja asetukset on säädetty halutunlaisiksi, voidaan analyysi käynnistää ja esittää tulokset. Kun analyysi on suoritettu, tuloksia voidaan tarkastella suoraan verkkomallissa tai ne voidaan tulostaa taulukoissa. Myös erilaisten käyrien piirtäminen onnistuu ja tuloksia voidaan tarkastella jännitteen käyrämuodoista tai palkkikuvaajista. Kuvassa 6.7 on esitetty tulostusnäkyminen Neplanissa solmupisteiden kokonaisjännitesärön osalta taulukkomuodossa.

	ID	Name	THD	f	U	u	U ang
			%	Hz	V	%	°
1	118	BUS 1	29,96	250	178,732	25,9	0
2				350	39,255	5,69	0
3				550	86,884	12,59	0
4				650	40,748	5,91	0

**Kuva 6.7.** Yliaaltoanalyysin tulostusnäkyminen Neplanissa solmupisteiden kokonaisjännitesärön osalta.

Kuvassa 6.7 solmupistetietoihin on merkitty solmupisteen tunnus ID, solmupisteen nimi, kokonaissärö THD, taajuus f, solmupisteen jännite U, solmupisteen jännite prosentteina ja jännitteen kulma U ang.

Kuvassa 6.8 on esitetty tulostusnäkyvä Neplanissa komponenttien kokonaisvirtasärön osalta taulukkomuodossa.

	ID	From	To	Element Name	Type	THDi	f	I1	I1 ang	I2	I2 ang	U12	U12 ang
						%	Hz	A	°	A	°	V	°
1	1229796	CABLE C		CHILLER	Asynchronou	0,28	250	7,422	0			178,628	0
2							350	1,166	0			39,222	0
3							550	1,644	0			86,794	0
4							650	0,6525	0			40,704	0

**Kuva 6.8.** Yliaaltoanalyysin tulostusnäkyvä Neplanissa komponenttien kokonaisvirtasärön osalta.

Kuvassa 6.8 oleva taulukko sisältää seuraavat tiedot:

- ID on komponentin tunnistuskoodi
- From on solmupiste, josta komponentti lähtee
- To on solmupiste, johon komponentti päättyy
- Element Name on komponentin nimi
- Type on komponentin tyyppi esim. kaapeli, muuntaja, moottori...
- $THD_i$  on kokonaisvirtasärö
- f on taajuus
- $I_1$  ja  $I_2$  ovat virtoja From- ja To- solmupisteissä
- $I_1$  ang ja  $I_2$  ang ovat virtojen kulmat
- $U_{12}$  ja  $U_{12}$  ang ovat solmupisteiden From ja To välinen jännite ja kulma

Tarkasteltavan verkon yliaaltoanalyysin tulokset on nähtävillä liitteiden 5 ja 6 taulukoissa. Liitteessä 5 on komponenttien tulokset kokonaisvirtasärön  $THD_i$  (%) osalta ja liitteessä 6 solmupisteiden tulokset kokonaisjännitesärön THD (%) osalta. Tuloksissa on mukana ainoastaan komponentit, jotka osallistuvat poraukseen eli esimerkiksi Draw-works Motor A ja B eivät ole mukana tuloksissa. Liitteiden taulukot tuloksista on tehty Excel- taulukkotyökalun avulla eli tiedot on siirretty suoraan Neplanista Exceliin. Liitteiden taulukoissa on esitetty vain tärkeimmät tulokset yliaalloista. Liitteessä 7 on esitetty tulokset verkkomallinäkyvässä. Liitteen 7 kuvaan on merkitty vihreällä eri komponenttien kokonaisvirtasärön  $THD_i$  (%) tulokset ja sinisellä merkityt ovat solmupisteiden kokonaisjännitesärön THD (%) tulokset. Yliaaltoanalyysin tuloksia voidaan tarkastella myös kuvaajien avulla ja liitteessä 8 on esitetty esimerkkinä W.M. Heater- komponentin jännitekäyrä sekä palkkikuvaaja jännitteen sisältämistä yliaalloista.

Tuloksista huomataan, että jännitesärön suuruus verkon eri osissa on suhteellisen korkea. Pääkiskossa BUS 1 jännitesärön suuruus on lähes 44 %, joka on reilusti yli luokitustilaston asettaman rajan (8 %). Myös kokonaisvirtasärön suuruus ylittyy esimerkiksi

muuntajan T1 osalta. Verkko näyttäisi siis tarvitsevan suodatusta, jotta yliaaltojen aiheuttamia jännite- ja virtasäröjä saadaan vähennettyä.

### 6.3 Verkko yliaaltosuodattimilla

Verkkoon on asennettu ja mitoitettu yliaaltosuodattimet poistamaan lähtökohtaisesti 5. ja 7. yliaaltoa. Yliaaltosuodatin toimii samalla myös loistehon kompensointilaitteena. Neplan-mallissa (liite 3) viidennen yliaallon suodatin (Harmonics filter 1) koostuu kolmesta rinnakkaisesta RCL- piiristä, joiden tekniset arvot ovat samansuuruiset. Mallissa nämä kolme piiriä on yhdistetty yhdeksi kokonaisuudeksi, jolloin esimerkiksi loistehon ja kapasitanssin arvot ovat kolminkertaiset. Mallissa 7. yliaallon suodatin on merkitty ”Harmonics filter 2” ja ”Harmonics filter 2.1 ” on viritetty 189 Hz:n taajuudelle. Liitteessä 4 on esitetty yksiviiadiagrammina suodattimien kytkentä. Taulukkoon 5.6 on koottu tekniset tiedot suodattimista, joiden arvot on saatu valmistajan ilmoittamista tiedoista.

**Taulukko 5.6.** Yliaaltosuodattimien tekniset tiedot.

	$U_r$ (V)	$R$ ( $\Omega$ )	$L$ (mH)	$C$ ( $\mu$ F)	$Q_r$ (kvar)	$f_0$ (Hz)	$G$
H. Filter 1	690	0,017	0,0733	5766	900	245	6,63
H. Filter 2	690	0,042	0,111	1919	293	345	5,73
H. Filter 2.1	690	0,042	0,259	2736	440	189	7,33

Taulukossa 5.6  $f_0$  tarkoittaa resonanssitaajuutta, joka on laskettu kaavalla 3.8. Ohjelma laskee myös automaattisesti kyseisen arvon, kun induktanssi  $L$  ja kapasitanssi  $C$  on syötetty. Tunnus  $G$  tarkoittaa suodattimen hyvyyslukua, joka saadaan kaavasta

$$G = \frac{2\pi f_0 L}{R}. \quad (5.1)$$

Kaavassa  $f_0$  on resonanssitaajuus,  $L$  suodattimen induktanssi ja  $R$  suodattimen resistanssi. Kyseinen kaava on esitetty Neplanissa suodattimen help- valikossa. Ohjelma laskee myös tämän arvon automaattisesti, kun muut tiedot on syötetty.

Liitteissä 9, 10 ja 11 on esitetty verkon yliaaltotulokset, kun verkkoon on liitetty edellä kuvatut yliaaltosuodattimet. Liitteessä 9 on esitetty verkon kokonaisvirtasärö  $THD_i$  (%) ja liitteessä 10 kokonaisjännitesärö  $THD$  (%) verkon eri solmupisteissä. Liitteessä 11 on esitetty tulokset vielä suoraan verkkonäkymässä. Näiden lisäksi liitteessä 12 on esitetty vielä vertailun vuoksi W.M. Heater – komponentin jännitekäyrä ajan funktiona sekä palkkikuvaaja jännitekäyrän sisältämistä yliaalloista.

Tuloksista havaitaan, että jännite- ja virtasärön suuruus pienenee merkittävästi, kun suodattimet liitetään verkkoon. Esimerkiksi pääkiskon BUS 1 kokonaisjännitesärö putoaa todella paljon, sillä ennen suodattimia kokonaisjännitesärö oli 43 % ja suodattimien kanssa 3,4 %. Lisäksi liitteen 12 kuvaaja on huomattavasti puhtaampi siniaalto, kuin mitä se oli liitteessä 8. Kaiken kaikkiaan kokonaisjännitesärön ja kokonaisvirtasärön suuruudet missä tahansa verkon pisteessä laskevat sallittuihin rajoihin.

## 7. JOHTOPÄÄTÖKSET

### 7.1 Yliaaltoanalyysin tulokset

Tulosten perusteella voidaan todeta, että valmistajan mitoittamat suodattimet näyttäisivät suodattavan hyvin tasasuuntaajien aiheuttamia yliaaltoja ja mitoitus on tehty oikein. Luokituslaitoksen asettamaan 8 % rajaan on myös hyvin varmuusmarginaalia. Ilman suodattimia verkon yliaaltopitoisuus ja kokonaissäröprosentit ovat melko suuria, joten suodattimille on ehdottomasti tarvetta kyseisessä verkossa. Kaiken kaikkiaan havaitaan, että suuntauslaitteet ovat sähköverkon kannalta erittäin harmillisia komponentteja ja suodattimien tarve on melko todennäköinen suuntaajia käytettäessä.

Tuloksissa on huomioitu ainoastaan tasasuuntaajien aiheuttamat yliaallot ja muut komponentit on jätetty yliaaltolähteinä huomiotta. Todellisuudessa oikosulkumoottorit, generaattorit ja muuntajat aiheuttavat jonkin verran yliaaltoja verkkoon. Verrattuna kuitenkin tasasuuntaajien aiheuttamiin yliaaltoihin muiden komponenttien yliaaltopitoisuudet ovat vähäisiä ja niiden huomiointi ei vaikuta tuloksiin kovinkaan radikaalisti. Tasasuuntaajien aiheuttamat yliaallot on saatu valmistajalta, joten niiden oikeellisuudesta ei ole täyttä varmuutta. Laitteiden synnyttämät yliaallot eivät ole yleensä positiivinen asia, joten niiden määriä ei välttämättä ole edes saatavilla valmistajalta tai niitä ei haluta ilmoittaa. Verkkomallissa komponenttien taajuusriippuvuuksia ei ole huomioitu myöskään riittävän tarkasti, jolloin tulokset saattavat olla jonkin verran virheellisiä. Taajuusriippuvuuden syöttäminen komponentteihin osoittautui haasteelliseksi, koska ohjelmiston tekijältä ei saatu tarvittavia mallikirjastoja ja ohjeet olivat puutteelliset. Tarkasteltava verkko on myös erotettu muusta verkosta, jolloin yliaallot eivät pääse etenemään muualle. Yliaaltopitoisuudet saattaisivat olla pienempiä tarkasteltavassa verkon osassa, jos koko muu verkko olisi huomioitu. Tosin pääkiskon toiseen puolikkaaseen BUS 2 on kytketty myös tasasuuntaajia, jotka vain lisäävät yliaaltojen määrää ja tätä kautta tulokset saattaisivat olla vielä huonompia.

Tulosten oikeellisuudesta ja luotettavuudesta ei voida olla varmoja, sillä mittausaineistoa yliaalloista kyseisestä verkosta ei ole saatavilla ja mittauksia yliaaltojen osalta ei ole myöskään tehty kyseisessä verkossa. Mittausten avulla saataisiin tehtyä vertailua Neplanin laskemiin tuloksiin ja tätä kautta voitaisiin pohtia niiden oikeellisuutta. Neplanin yliaaltoanalyysin toimivuudesta voidaan kuitenkin todeta se, että kytkemällä verkkomalliin suodattimet, yliaaltopitoisuudet pienenevät selvästi myös mallissa. Tätä kautta voitaisiin vertailla ainakin prosentuaalisesti suodattimien vaikutusta yliaaltojen kannalta, vaikka absoluuttiset arvot saattaisivat olla pielessä. Yliaaltopitoisessa verkossa joidenkin komponenttien, kuten katkaisijoiden ja muuntajien, mitoituksessa ja kuormitet-

tavuudessa pitää huomioida mahdolliset yliaaltovirrat ja tarvittaessa mitoittaa ne hieman suuremmiksi. Neplanin avulla mitoittukseen liittyvät tehtävät ja toiminnot onnistuvat melko helposti, koska tulokset ovat kattavia.

## 7.2 Ohjelman käytettävyys

Neplan-ohjelmisto täyttää pääsääntöisesti erittäin hyvin kappaleessa 4.1.3 mainitut ABS-luokituslaitoksen määrittämät ominaisuudet hyvästä ohjelmistosta. Neplanissa on mahdollista simuloida erittäin laajaa verkkoa, sillä solmupistemäärä on periaatteessa rajaton, riippuen lisenssin laajuudesta. Ohjelmassa solmupisteiden määrää vähentää kuitenkin pakollinen ylimääräisten solmupisteiden lisääminen verkkomalliin. Verkkoon pitää lisätä aina solmupiste siihen kohtaa, josta halutaan selville vaikkapa jännite. Isoa verkkoa rakennettaessa solmupisteraja tulee yllättävän nopeasti vastaan ja mallin kokoa joutuu pienentämään. Lisäksi DC- kaapelia lisääessä verkkoon sen molempiin päihin pitää lisätä solmupisteet, jossa tuhlaantuu solmupisteitä turhaan.

Kuten tuloksista huomataan, ohjelmassa saadaan laskettua samanaikaisesti sekä kokonaisjännite- että kokonaisvirtasärön suuruus ja mallissa voi esiintyä useampia erilaisia yliaaltojen lähteitä. Tulosten esittäminen ja tulosten siirtäminen Neplanista vaikkapa taulukkotyökaluun onnistuu helposti ja ne ovat ymmärrettävässä muodossa. Lisäksi tulosten esittäminen käyrämuodoissa tai spektriesityksinä on erittäin hyvä ominaisuus. Myös mahdollisten resonanssipisteiden etsiminen onnistuu, kun jonkin pisteen taajuusvasteesta saadaan tulostettua kuvaaja. Tulosten tekeminen on kaiken lisäksi suhteellisen nopeaa ja laskentamoduulin vaihto, esimerkiksi yliaaltolaskennasta tehonjakoon, onnistuu helposti.

Tulosten tarkastelu suoraan verkkomallissa voi sen sijaan olla epäselvää, jos verkkomalli on rakennettu tiiviiksi. Solmupisteiden ja komponenttien ympärille ilmestyviin kyltteihin saadaan valittua todella paljon näkyviin erilaisia tietoja ja pian verkkomallissa ei välttämättä näy kunnolla muuta kuin kylttejä. Ison verkkomallin tapauksessa kylteissä näkyviä tietoja on lähes pakko muokata ja vähentää, mikäli yhdellä silmäyksellä haluaa saada selkeän kuvan oleellisista tiedoista. Piirtoaluetta on toki mahdollisuus kasvattaa, mutta koko verkkomallin saaminen yhteen ikkunaan on haasteellista. Isossa verkossa tulosten tarkastelu on helpompaa, kun jakaa verkon osiin ja luo jokaiselle osalle oman välilehden. Tässä saattaa kuitenkin verkon kokonaiskuva hämärtyä, jos verkon osat ovat monissa eri välilehdissä. Kaiken kaikkiaan tulosten tarkastelu on selkeintä kuitenkin suoraan verkkomallissa esimerkiksi taulukoihin verrattuna. Ohjelma värjää muun muassa ylikuormitetut johto-osuudet punaiseksi, jolloin ylikuormituskohdat on mahdollista havaita todella nopeasti verkkomallinäkylässä.

ABS määrittelee hyvän ohjelman ominaisuudeksi myös laajan komponenttikirjaston. Neplanin sisältämät komponenttikirjastot ovat erittäin kattavia ja erilaisia komponentteja löytyy tarvittava määrä. Ohjelmaan on myös helppo luoda itse omia komponentteja tai rakentaa omia kirjastoja. Ongelmaksi muodostui tarkasteltavan verkon kohdalla kuitenkin tasasuuntaajien mallinnus ja niiden syöttämät yliaallot. Ohjelmassa voi tavallisen kuorman kohdalla syöttää suoraan kuorman tietoihin sen aiheuttamat yliaallot, mutta tasasuuntaajan kohdalla näin ei pystynyt tekemään. Tällöin jouduttiin luomaan oma erillinen virtalähde tasasuuntaajien rinnalle niin kuin kappaleessa 6.1 todettiin. Tämä tekee simuloinnista hieman haastavaa ja ulkopuolisen silmin katsottuna ylimääräiset virtalähteet verkossa ovat vähintäänkin huomiota herättäviä. Ohjelman valmiit kirjastot, esimerkiksi erilaisten suuntaajien yliaaltosisällöistä, ovat suppeita ja käyttäjän on syytä määrittää ne joka kerta itse. Myös komponenttien taajuuskäyttäytymisestä ei ollut tarjolla kirjastoja valmiina ja niiden luonti olisi ollut haastavaa.

Kaiken kaikkiaan ohjelman tarjoamat apuvalikot ja ohjeet ovat melko selkeitä ja esimerkiksi komponentteihin syötettäviin arvoihin löytyy ainakin jonkinlainen selvitys. Joissain tapauksissa ohjelman selvitykset ovat kuitenkin lyhyitä ja käyttäjä joutuu selvittämään tiedon jotain muuta kautta. Etenkin kuvaukset laskentamenetelmistä ja laskennan asetuksista ovat hyvin pelkistettyjä tai niitä ei ole selitetty riittävän tarkasti. Lähtötietojen suuri määrä tekee ohjelmasta myös alkuun vaikeakäyttöisen ja käyttäjän pitää olla tietoinen sähkötekniikassa esiintyvistä suureista ja symboleista. Syötettävien lähtötietojen suuren määrän vuoksi oleellisten lähtötietojen löytäminen ja niiden syöttäminen ohjelmaan saattaa olla haastavaa. Ohjelma on suhteellisen avoin ja käyttäjä pystyy määrittelemään melko vapaasti erilaisia asioita ohjelmaan, mutta toisaalta ohjelma on myös erittäin herkkä ilmoittamaan virheistä. Tällöin laskenta ei etene ja ohjelman etsintä saattaa kestää kauan.

Neplanilla verkon mallintaminen on suhteellisen helppoa ja verkkomallin pystyy rakentamaan melko nopeasti. Verrattaessa kuitenkin liitteessä 2 AutoCAD- ohjelmistolla piirrettyä kuvaa ja liitteen 3 Neplanilla mallinnettua verkkokuvaa huomataan, että AutoCAD on selvästi parempi ja selkeämpi piirtämisen kannalta. AutoCAD:lla piirtäminen on joustavampaa ja ison verkon esittäminen pienessä tilassa on helpompaa. AutoCAD tosin on tehty vain piirtämistä varten, kun taas Neplanilla onnistuu piirtämisen lisäksi myös laskelmien teko. Neplanilla onnistuu siis kahden työn tekeminen samalla kertaa eikä ohjelmaa tarvitse vaihtaa, kun aletaan tehdä laskelmia. Tämän myötä suunnittelijat pystyisivät luopumaan mahdollisista ylimääräisistä ohjelmista ja keskittymään vain yhteen ohjelmaan. Neplanin käyttämät piirrosmerkit joidenkin komponenttien kohdalla eivät ole kuitenkaan täysin yleisesti käytettyjä, jolloin piirustusten esittäminen Neplanilla ei välttämättä riitä ja niistä halutaan myös AutoCAD- versiot.

### 7.3 Parannusehdotukset

Jotta ohjelman käyttö tulisi entistä vaivattomammaksi ja nopeammaksi, ohjelmaan olisi hyvä luoda osittain valmiita mallipohjia erilaisista kytkentätilanteista ja sähköverkoista. Lisäksi erilaisia laskelmia tehdessä laskennan asetukset olisivat hyvä olla valmiiksi jo asianmukaiset, jotta niitä ei tarvitse aina määrittää uudestaan. Täten laskenta sujuisi nopeammin ja asiakkaille pystyttäisiin luomaan tuloksia hyvin lyhyessä ajassa. Ohjelmassa asetukset saattavat muuttua tai nollaantua, kun rakennetaan uusi verkkomalli tai ohjelma suljetaan. Tämä hidastaa työskentelyä ja haittaa varsinkin siinä tapauksessa, jos laskennan tekijä vaihtuu kesken kaiken.

Piirrosmerkkien yhtenäistäminen ja niiden tekeminen kaikkien standardien mukaiseksi on myös kehitystä vaativa asia. Esimerkiksi katkaisijalle oleva piirrosmerkki Neplanissa ei ole samanlainen kuin Autocadissa (vertaa liite 2 ja 3) ja tästä saattaa aiheutua ongelmia asiakkaiden kanssa. Piirrosmerkeistä pitäisi olla saatavilla kaikkien standardien ja luokitusten hyväksymät piirrosmerkit, jolloin ongelmat kuvien hyväksyttämisessä poistuisivat.

Ohjelman tekijältä pitäisi saada myös tarkemmat käyttöohjeet koko ohjelmasta, jotta jokaista pientä yksityiskohtaa ei tarvitsisi kysellä jälkikäteen sähköpostitse tai soittamalla. Vaikka monisivuiset käyttöohjeet ovat usein raskasta luettavaa, pienillä yksityiskohdilla esimerkiksi laskennassa käytetyistä menetelmistä saattaa olla ratkaiseva merkitys ymmärtämisen kannalta. Lisäksi laskentaa tehdessä joidenkin lähtötietojen rajaaminen voisi helpottaa ja nopeuttaa työskentelyä. Kun valitaan jokin laskentamoduuli, ohjelma voisi sen perusteella sulkea pois asetuksia, joita kyseisessä laskennassa ei tarvita tai niillä ei ole merkitystä tulosten kannalta. Toisaalta kun kaikki mahdolliset asetukset on säädetty, laskentamoduulien vaihto sujuu nopeammin ja pystytään tekemään monen eri laskennan tulokset nopeasti. Jos asiakas on tilannut esimerkiksi vikavirtalaskelmat ja katkaisijoiden suojausasettelut, samalla voitaisiin tarjota pientä lisähintaa vastaan myös yliaaltolaskelmat.



## 8. YHTEENVETO

Työssä tutustuttiin yleisesti laivasähköverkon rakenteeseen ja sähkön laadun kannalta olennaiseen ilmiöön eli yliaaltoihin ja niiden vaikutuksiin tarkasteltavassa verkossa. Lisäksi selvitettiin lyhyesti tulevaisuuden näkymiä laivasähkötekniikan osalta sekä tarkoituksena oli selvittää yliaaltoja ilmiönä ja tutustua teoriaan niiden osalta. Tämän jälkeen yliaaltoja tutkittiin malliverkossa tietokoneohjelmiston avulla ja ohjelmiston käytettävyys oli tässä kohtaa yksi suurimmista tarkastelun kohteista.

Yliaaltojen tarkastelu kohdistui öljynporauslautan sähköverkkoon ja 690 V sähkönjake- luun. Öljynporauslautan sähköverkkoa ja yliaaltoja mallinnettiin Neplan- verkostolas- kentaohjelmiston avulla. Ohjelman avulla öljynporauslautan verkosta pystyttiin muo- dostamaan verkkomalli ja tämän jälkeen verkossa esiintyvien yliaaltojen kokonaisjänni- te- ja kokonaisvirtasäro laskettiin ohjelmiston harmoninen analyysi- moduulin avulla. Samalla tutkittiin ohjelman käytettävyyttä ja sen toimivuutta kokonaisuudessaan, sillä ohjelmisto oli yritykselle uusi ja sen käyttöaste oli ollut toistaiseksi matala. Ohjelman käytettävyys verkkojen kuvaamisessa ja eri laskentatilainten tarkastelussa voitiin todeta hyväksi ja myös joltain osin helpoksi. Ohjelman sisältämät laskentamoduulit ovat laajoja ja erilaisia laskelmia pystytään tekemään kattavasti. Ohjelmasta saadut tulokset ovat helposti esitettävissä joko suoraan verkkonäkymässä tai taulukoissa ja esitettävien tulosten muokkaaminen käyttäjän tarpeiden mukaisesti onnistuu helposti.

Tarkasteltavassa verkossa suurimmat yliaaltoja tuottavat lähteet olivat mutapumppujen tasasuuntauslaitteet. Tasasuuntaajien synnyttämät yliaallot saatiin valmistajalta. Yliaal- toanalyysi tehtiin tilanteessa, jossa poraus oli käynnissä. Tämän myötä joitakin kuormia ei ollut mallinnuksessa käytössä, mutta yliaaltojen kannalta suurimmat kuormat olivat käytössä ja tulokset olivat tällöin pahimman mahdollisimman tilanteen mukaiset. Ver- kon tulokset esitettiin ilman yliaaltosuodattimia ja yliaaltosuodattimien kanssa, jolloin nähtiin selkeästi, että suodatuksen tarve verkossa oli suuri. Ilman suodattimia kokonais- säröt verkossa olisivat olleet yli luokituslaitosten sallittujen rajojen. Tulosten tarkkuu- desta ja ohjelmiston laskelmien toimivuudesta ei voida olla täysin varmoja, koska mit- tauksia yliaalloista ei ole tehty kyseisessä verkossa. Lisäksi muutamat lähtötiedot olivat puutteellisia tai niitä ei saatu selville ollenkaan. Verkossa on otettu huomioon ainoas- taan tasasuuntaajien aiheuttamat yliaallot, vaikka muissakin verkon laitteissa saattaa esiintyä yliaaltoja. Öljynporauslautan 690 V verkosta tutkittiin ainoastaan toista puolis- koa, jolloin tarkkoihin laskelmiin pitäisi huomioida lisäksi koko loppuverkko.

Ohjelmisto täyttää hyvin ABS-luokituslaitoksen asettamat ehdot hyvälle yliaaltoanalyysi-ohjelmistolle. Ohjelmassa solmupisteiden määrä ja komponenttikirjastojen laajuus on hyvällä tasolla. Tulosten tarkastelu ohjelmassa on kattavaa, mutta suoraan verkkonäkymässä tulokset saattavat olla huonosti nähtävillä. Tähän asiaan pystyy kuitenkin vaikuttamaan rakentamalla verkkomallin riittävän väljäksi. Ongelmia ohjelman käytössä muodostui lähinnä lähtötietojen ja asetusten laajuudessa. Syötettävien lähtötietojen määrä joillekin komponenteille oli valtava, minkä vuoksi oleellisten tietojen syöttäminen muodostui haasteeksi. Lisäksi oleellisten asetusten syöttäminen ohjelmaan muodostui vaikeaksi ja ohjeita piti selata kauan, jotta tieto eri asetusten vaikutuksista löytyi. Ohjelmalla mallintaminen on kuitenkin nopeaa ja verkkomallin rakentaminen onnistuu nopeasti. Verrattuna AutoCAD-ohjelmistoon, piirto-ominaisuudet ovat huomattavasti rajallisemmat Neplanissa. Kaiken kaikkiaan ohjelmassa laskeminen ja tulosten tekeminen on kuitenkin nopeaa ja selkeää, mikä tekee ohjelmasta erittäin hyödyllisen työkalun.

Hyvinä parannusehdotuksina ohjelman käyttöön todettiin, että valmiiden mallipohjien tekeminen nopeuttaisi sen käyttöä merkittävästi. Lisäksi eri asetusten asettaminen valmiiksi ja niiden tallentaminen nopeuttaisi myös erilaisten laskelmien tekoa. Myös piirrosmerkkien yhtenäistäminen ja mukauttaminen eri standardeihin ja luokituksiin sopiviksi olisi hyvä tehdä. Ohjelman sisältämät käyttöohjeet ja apuvalikot ennen kaikkea laskentamenetelmistä todettiin olevan jossain määrin puutteelliset ja tarkennukset niihin olisivat hyväksi. Eri lähtötietojen rajoittaminen laskentamoduuliin sopiviksi säästäisi aikaa ja helpottaisi laskelmien tekoa huomattavasti. Lähtötietojen laajuuden takia kuitenkin eri laskentamoduulien käyttö ja niiden vaihtaminen kesken laskelmien on nopeaa. Ohjelman merkittävimmät vahvuudet ovat verkkomallin helppo päivittäminen kesken laskelmien sekä verkkomallin koon kasvattaminen erittäin suureksi.

## LÄHTEET

- [1] A.K. Ådnanes, Marine Electrical Installations And Diesel Electric Propulsion, ABB AS Marine, Oslo, 2003, 86 p. Saatavissa (viitattu 18.6.2015):  
<https://www192.abb.com/LVPCanada/Catalogues/Segment%20Information/Marine/Tech%20Paper%20Marine%20Electrical%20Installation.pdf>
- [2] P. Häkkinen, Laivan konejärjestelmät, Aalto yliopisto, 2014, luentomoniste, s. 106-121, Saatavissa (viitattu 22.6.2015): [https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/kul-24.4410/materiaali/Kul-24\\_4410\\_oppikirjan\\_luku\\_6.pdf](https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/kul-24.4410/materiaali/Kul-24_4410_oppikirjan_luku_6.pdf)
- [3] W. Maes, Marine Electrical Knowledge, Antwerp Maritime Academy, Antwerpen, 2013, 52 p. Saatavissa (viitattu 22.6.2015):  
[http://magelhaes.hzs.be/willem/assorted/marine\\_electrical\\_knowledge.pdf](http://magelhaes.hzs.be/willem/assorted/marine_electrical_knowledge.pdf)
- [4] ABB Marine Academy, Complementary range of training solutions, Saatavissa (viitattu 22.6.2015):  
[http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/5ae6d7c2c0918422482578b70028836f/\\$file/Marine+Academy+2010.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/5ae6d7c2c0918422482578b70028836f/$file/Marine+Academy+2010.pdf)
- [5] Bureau Veritas Finland, Laivojen ja meriteknisten rakenteiden luokitus, Saatavissa (viitattu 23.6.2015):  
[http://www.bureauveritas.fi/wps/wcm/connect/bv\\_fi/local/services+sheet/laivojen\\_ja\\_meriteknisten\\_rakenteiden\\_luokitus](http://www.bureauveritas.fi/wps/wcm/connect/bv_fi/local/services+sheet/laivojen_ja_meriteknisten_rakenteiden_luokitus)
- [6] R. Hämäläinen, Luokituslaitosten näkemykset alusten turvallisuusjohtamisjärjestelmistä, Kymenlaakson Ammattikorkeakoulu, opinnäytetyö, 2011, 60 s.
- [7] R.L. Harrington, Marine Engineering, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, New York, USA, 1992, 966 p.
- [8] T. A. Pedersen, Bond Graph Modeling of Marine Power System, dissertation, Norwegian University of Science and Technology. Publication 56, 2009, 155 p. Saatavissa:  
[http://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/237668/218922\\_FULLTEXT01.pdf?sequence=1](http://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/237668/218922_FULLTEXT01.pdf?sequence=1)
- [9] MAN Diesel & Turbo, Diesel-Electric Drives, Saatavissa (viitattu 24.6.2015):  
<http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/marine-broschures/diesel-electric-drives.pdf?sfvrsn=4>
- [10] J. Bastman, Sähkökoneet, Tampereen Teknillinen Yliopisto, Tampere, 2014, opetusmoniste, 194 s.

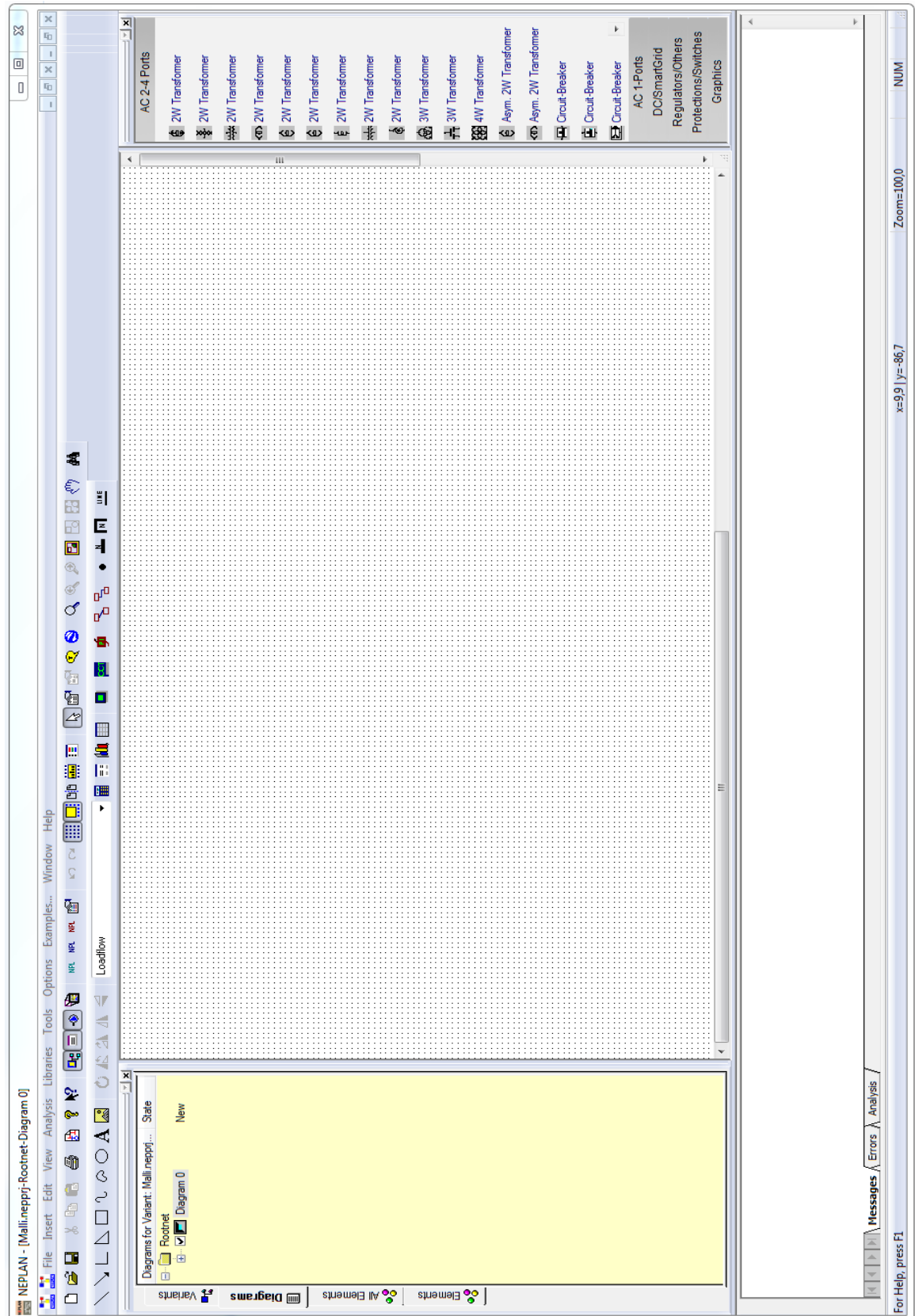
- [11] L. Korpinen, Sähkövoimatekniikkaopus, 1998, Saatavissa (viitattu 25.6.2015):  
<http://www.leenakorpinen.fi/node/158>
- [12] H. Kaiti, teknikko, tiiminvetäjä, Elomatic Oy, Turku, Haastattelu 25.6.2015.
- [13] M. A. Laughton & D. J. Warne, Electrical Engineer's Reference Book, 16<sup>th</sup> ed., Newnes, Oxford, 2003, 1498 p.
- [14] ABB Marine, Shaft generator drive for marine, Saatavissa (viitattu 26.6.2015):  
[https://library.e.abb.com/public/439229cbf491151c48257d150041783d/17163\\_Shaft\\_generator\\_drive\\_for\\_marine\\_EN\\_3AUA0000165329\\_RevA\\_lowres.pdf](https://library.e.abb.com/public/439229cbf491151c48257d150041783d/17163_Shaft_generator_drive_for_marine_EN_3AUA0000165329_RevA_lowres.pdf)
- [15] MAN Diesel & Turbo, Hybrid Propulsion, Saatavissa (viitattu 30.6.2015):  
<http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/default-document-library/hybrid-propulsion.pdf?sfvrsn=0>
- [16] ABB Marine, Energy Efficiency Guide: Azipod, Saatavissa (viitattu 30.6.2015):  
[https://library.e.abb.com/public/e544a04176934040c1257c94002d31e5/Energy%20Efficiency%20Guide\\_Azipod.pdf](https://library.e.abb.com/public/e544a04176934040c1257c94002d31e5/Energy%20Efficiency%20Guide_Azipod.pdf)
- [17] ABB Marine, Azipod VI Series Product Introduction, Helsinki, 2010, Saatavissa (viitattu 30.6.2015):  
[https://library.e.abb.com/public/f524ca488f88beb2c12576e3004a96d8/Azipod\\_VI\\_project\\_guide\\_v5.pdf](https://library.e.abb.com/public/f524ca488f88beb2c12576e3004a96d8/Azipod_VI_project_guide_v5.pdf)
- [18] E. Tammiaho, Ruoripotkurilaitteiden liiketoiminta Suomessa, Tekesin katsaus 258, Tekes, Helsinki, 2009, 33 s. Saatavissa:  
[http://www.tekes.fi/globalassets/julkaisut/tekes\\_ruoripotkurit.pdf](http://www.tekes.fi/globalassets/julkaisut/tekes_ruoripotkurit.pdf)
- [19] J. Carlton, Marine Propellers and Propulsion, 3<sup>rd</sup> Edition, Elsevier Ltd., Kidlington, Oxford, UK, 2012, 544 p.
- [20] K. Nousiainen, Magneettipiirit ja muuntajat, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2013, opetusmoniste, 125 s.
- [21] Det Norske Veritas, DNV Rules for Classification of Ships, Det Norske Veritas AS, 2013, 131 p. Saatavissa (viitattu 02.07.2015):  
<https://exchange.dnv.com/servicedocuments/dnv>
- [22] ABB Oy, Tekninen opas nro 4: Nopeussäädettyjen käyttöjen opas, Saatavissa (viitattu 02.07.2015):  
[https://library.e.abb.com/public/32f0404329db7689c1256d2800411f0a/Tekninen\\_opas\\_nro4.pdf](https://library.e.abb.com/public/32f0404329db7689c1256d2800411f0a/Tekninen_opas_nro4.pdf)

- [23] B. Ozpineci, L.M. Tolbert, Cycloconverters, University of Tennessee-Knoxville, Knoxville, 17 p. Saatavissa (viitattu 07.07.2015):  
<http://www.uv.es/emaset/iep00/cycloconvertertutorial.pdf>
- [24] H. Mustonen, Virtakiskon virran mittaaminen avoimen magneettipiirin Hall-anturilla, Tampereen Teknillinen Yliopisto, diplomityö, 2015, 84 s.
- [25] EEUGUIDE, Cycloconverters, 2015, Saatavissa (viitattu 08.07.2015):  
<http://eeeguide.com/cycloconverters/>
- [26] Tukes, LED- valoputket loisteputkien korvaajina, Tukesin tiedote, 2014, 5 s. Saatavissa (viitattu 08.07.2015):  
[http://www.tukes.fi/Tiedostot/sahko\\_ja\\_hissit/ohjeet/LED\\_valoputket\\_loisteputkien\\_korvaajina.pdf](http://www.tukes.fi/Tiedostot/sahko_ja_hissit/ohjeet/LED_valoputket_loisteputkien_korvaajina.pdf)
- [27] ABB Oy, Energy efficiency guide, Helsinki, 2013, 192 p. Saatavissa (viitattu 09.07.2015):  
<https://library.e.abb.com/public/ce940f43aa732297c1257b860031260f/ABB%20Marine%20Energy%20Efficiency%20Guide%2004062013.pdf>
- [28] S. Sohlberg, Hybridisovellukset laivajärjestelmissä, Metropolia Ammattikorkeakoulu, opinnäytetyö, 2013, 43 s.
- [29] N. Mjøs, The future is hybrid: A guide to use of batteries in shipping, Hellenic Shipping News, 2015, Saatavissa (viitattu 10.07.2015):  
<http://www.hellenicshippingnews.com/the-future-is-hybrid-a-guide-to-use-of-batteries-in-shipping/>
- [30] Z. Zhou, M. Benbouzid, J. F. Charpentier, F. Scuiller, T. Tang, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, Vol. 18, 2013, pp. 390-400.
- [31] Corvus Energy, Energy Storage System: Technology & Specs, Saatavissa (viitattu 10.07.2015): <http://corvus-energy.com/Technology.html>
- [32] F. Martini, Setting a Course for Carbon- Free Shipping, Siemens, 2015, Saatavissa (viitattu 10.07.2015):  
<http://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/mobility-and-motors/electromobility-electric-ferries.html>
- [33] Teknologiateollisuus, Polttokennot, Teknologiateollisuus Ry, Saatavissa (viitattu 13.07.2015): <http://www2.teknologiateollisuus.fi/fi/palvelut/polttokennot-3027.html>
- [34] R. Mikkonen, Polttokennot ja vetyteknologia, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2006, Luentomoniste, 75 s.

- [35] R. Alanen, T. Koljonen, S. Hukari, P. Saari, Energian varastoinnin nykytila, VTT, Espoo, 2003, 156 s. Saatavissa (viitattu 13.07.2015):<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>
- [36] DNV GL, Fuel cells for ships, Position Paper 13, 20 p. Saatavissa (viitattu 13.07.2015):  
[http://www.dnv.com/binaries/Fuel%20Cell%20PosPaper%20FINAL\\_tcm4-525872.pdf](http://www.dnv.com/binaries/Fuel%20Cell%20PosPaper%20FINAL_tcm4-525872.pdf)
- [37] G. Ackermann, Simulation and Control of Harmonics in Ship Networks, International Conference on Power Systems Transients(IPST2013), Vancouver, Canada, July 18-20, 2013, 6 p.
- [38] L. Korpinen, M. Mikkola, T. Keikko, E. Falck, Yliaalto- opus, Saatavissa (viitattu 14.7.2015): <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf>
- [39] K. Nousiainen, Sähkövoimajärjestelmän perusteet, Tampereen Teknillinen Yliopisto, Tampere, 2012, opetusmoniste, 180 s.
- [40] R. Alanen, H. Hätönen, Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta: State of art –selvitys,VTT Working Papers 52, VTT, Espoo, 2006, 84 s. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W52.pdf>
- [41] A. Baggini, Handbook of Power Quality, John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, England, 2008, 642 p.
- [42] D. Shmilovitz, On the Definition of Total Harmonic Distortion and Its Effect on Measurement Interpretation, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, IEEE Power Engineering Society, 2005, pp. 526-528
- [43] ABB Oy, Tekninen opas nro.6: Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas, Saatavissa (viitattu 20.07.2015):  
[https://library.e.abb.com/public/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/Tekninen\\_opas\\_nro\\_6.pdf](https://library.e.abb.com/public/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/Tekninen_opas_nro_6.pdf)
- [44] A. Mäkinen, Yliaallot ja loistehon kompensointi, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2009, luentokalvot
- [45] Intelligent Energy Europe, Selecting Energy Efficient Distribution Transformers, A Guide for Achieving Least- Cost Solutions, Polish Copper Promotion Centre and European Copper Institute, 2008, 30 s. Saatavissa (viitattu 23.07.2015):  
[https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/seedt\\_technical\\_guide\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/seedt_technical_guide_en.pdf)

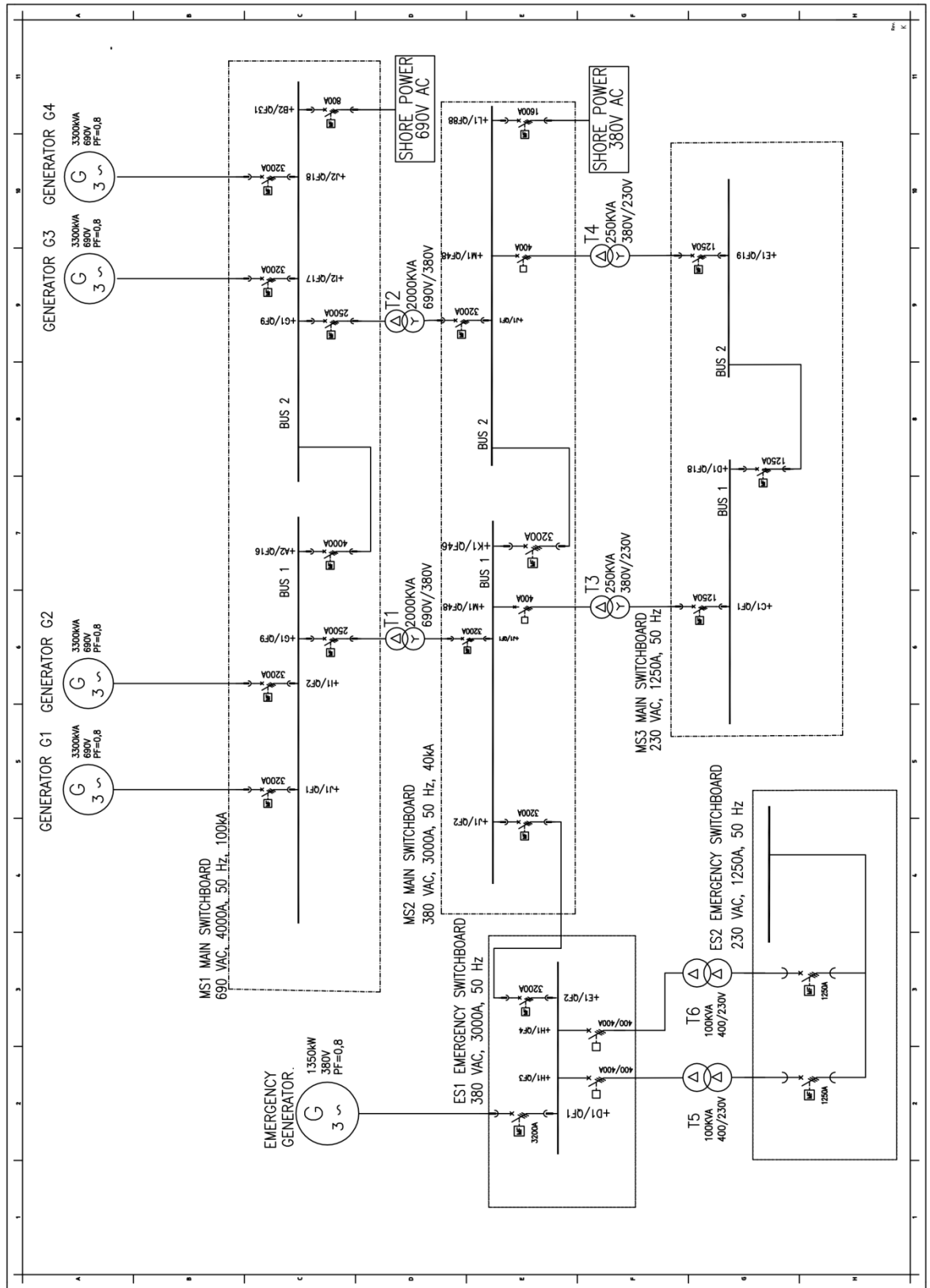
- [46] IEEE Std. 519-1992, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA, 1993, 99 p.
- [47] ABB Oy, Pienjänniteverkon aktiivisuodattimet, 2011, 12 s. Saatavissa (viitattu 30.07.2015):  
<https://library.e.abb.com/public/ba106ed9c27cb977c12578b50019b5fc/Pienjanniteverkon%20aktiivisuodattimet%20PQFI%20-%20PQFM%20-%20PQFK%20-%20PQFS%20low%20res.pdf>
- [48] Tampereen kondensaattoritehdas, Estokelaparistot, Saatavissa (viitattu 03.08.2015): <http://www.tkf.fi/estokelaparistot.php>
- [49] Wärtsilä Oy, Products and environmental aspects: Improving efficiency, Saatavissa (viitattu 04.08.2015):  
<http://www.wartsila.com/sustainability/environmental-responsibility/products-and-environmental-aspects/improving-efficiency>
- [50] Neplan: Power System Analysis Software, Neplan AG, Saatavissa (viitattu 06.08.2015): <http://www.neplan.ch/wp-content/uploads/2015/01/Electricity.pdf>
- [51] J. Bastman, Sähköverkon mallintaminen ja analyysi, Tampereen Teknillinen Yliopisto, Tampere, 2014, opetusmoniste, 177 s.
- [52] ABS, Rules for building and classing mobile offshore drilling units part 4: Machinery and systems, American bureau of Shipping, Houston, USA , 2014, 163 p.

# LIITE 1: NEPLAN- OHJELMAN KÄYTTÖLIITTYMÄ

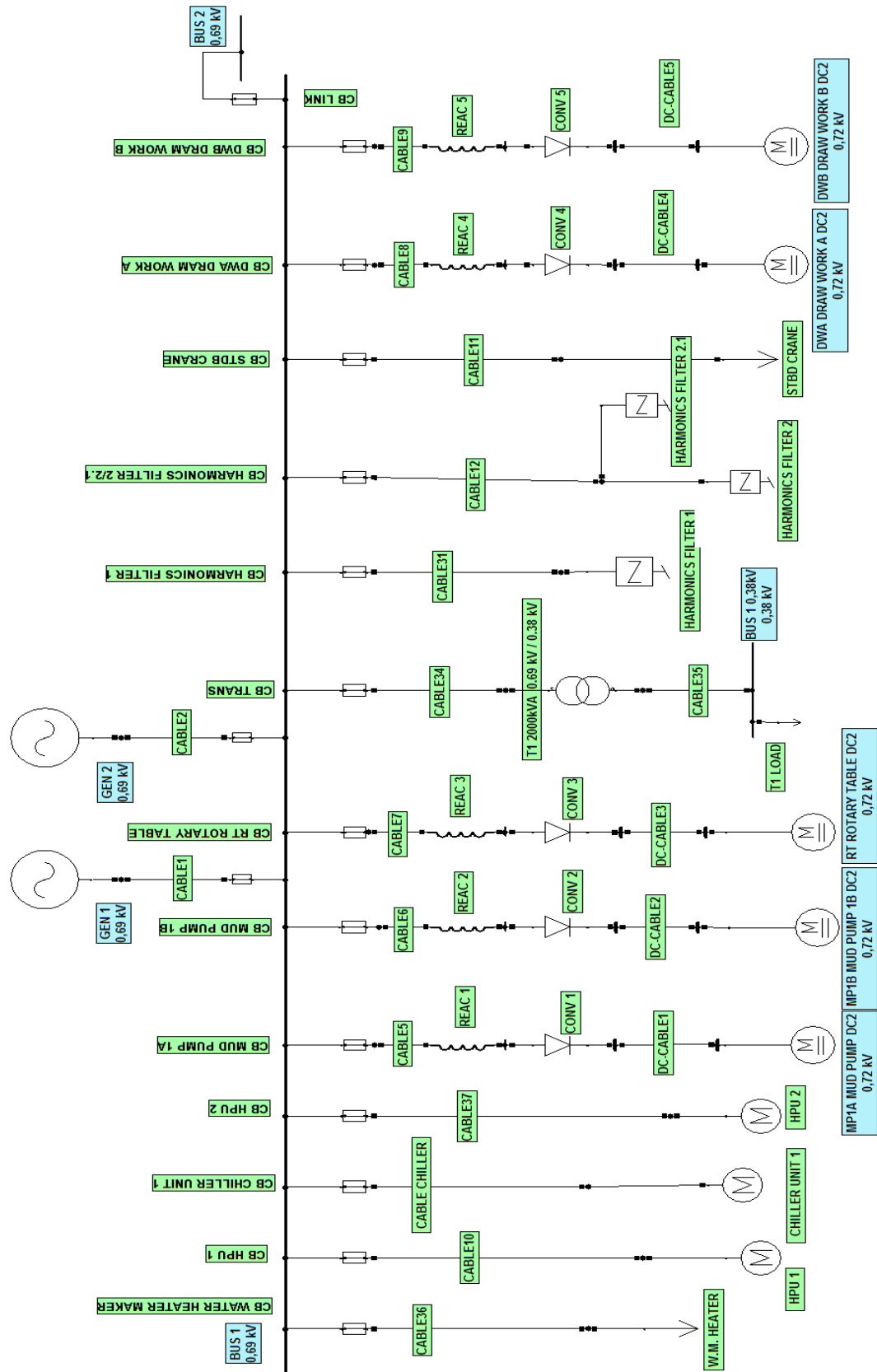




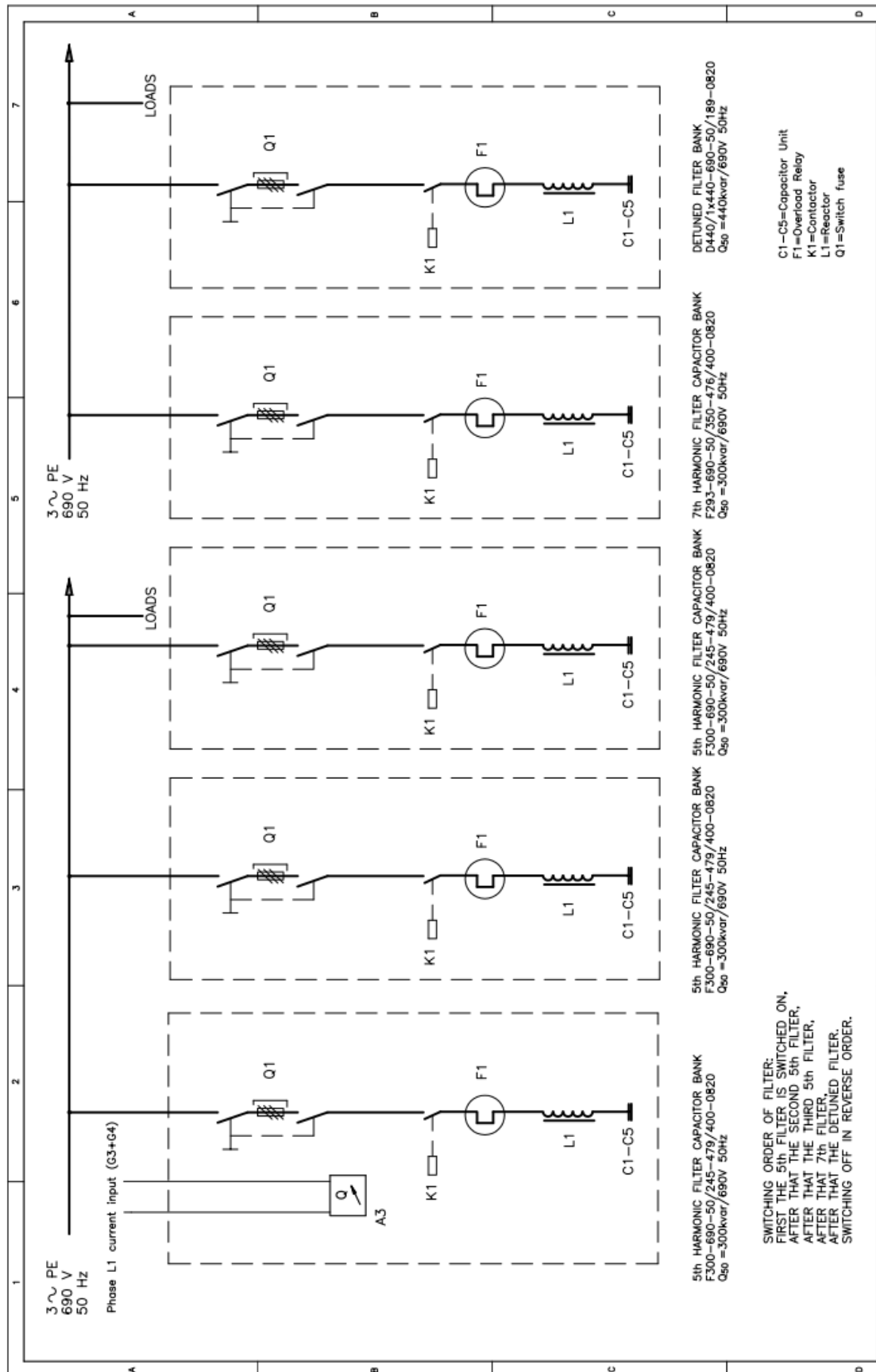
## LIITE 2: MALLIVERKON YKSIVIIVADIAGRAMMI



### LIITE 3: LAUTAN PÄÄTAULUN MS 1 KISKON BUS 1 YKSIVII- VADIAGRAMMI NEPLANISSA



# LIITE 4: SUODATTIMIEN KYTKENTÄKUVA



## LIITE 5: KOKONAISVIRTASÄRÖN TULOKSET ILMAN YLIAAL-TOSUODATTIMIA

Kuorma	Tyyppi	THD <sub>i</sub> (%)	f (Hz)	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	U <sub>12</sub> (V)
CABLE CHILLER	Johto	0,38	250	9,872	9,872	0,2803
			350	1,718	1,718	0,0679
			550	2,989	2,989	0,185
			650	1,307	1,307	0,0955
T1 2000kVA 0.69 kV / 0.38 kV	Muuntaja	11,38	250	293,209	532,406	122,212
			350	51,986	94,395	29,891
			550	91,519	166,18	81,923
			650	40,092	72,799	42,336
W.M. HEATER	Kuorma	1,99	250	43,24	0	237,712
			350	10,519	0	57,827
			550	28,726	0	157,921
			650	14,834	0	81,552
CABLE1	Johto	0	250	0	0	0
			350	0	0	0
			550	0	0	0
			650	0	0	0
CABLE10	Johto	0,24	250	6,111	6,111	0,1731
			350	1,064	1,064	0,0411
			550	1,851	1,851	0,1106
			650	0,8088	0,8088	0,0569
CABLE2	Johto	0	250	0	0	0
			350	0	0	0
			550	0	0	0
			650	0	0	0
CABLE34	Johto	11,38	250	293,209	293,209	1,071
			350	51,986	51,986	0,2617
			550	91,519	91,519	0,7169
			650	40,092	40,092	0,3704
CABLE35	Johto	11,38	250	532,406	532,406	1,256
			350	94,395	94,395	0,31
			550	166,18	166,18	0,8549
			650	72,799	72,799	0,4423
CABLE36	Johto	1,99	250	43,24	43,24	0,0803
			350	10,519	10,519	0,0196
			550	28,726	28,726	0,0542
			650	14,834	14,834	0,0282
CABLE37	Johto	0,24	250	6,111	6,111	0,1731
			350	1,064	1,064	0,0411
			550	1,851	1,851	0,1106
			650	0,8088	0,8088	0,0569

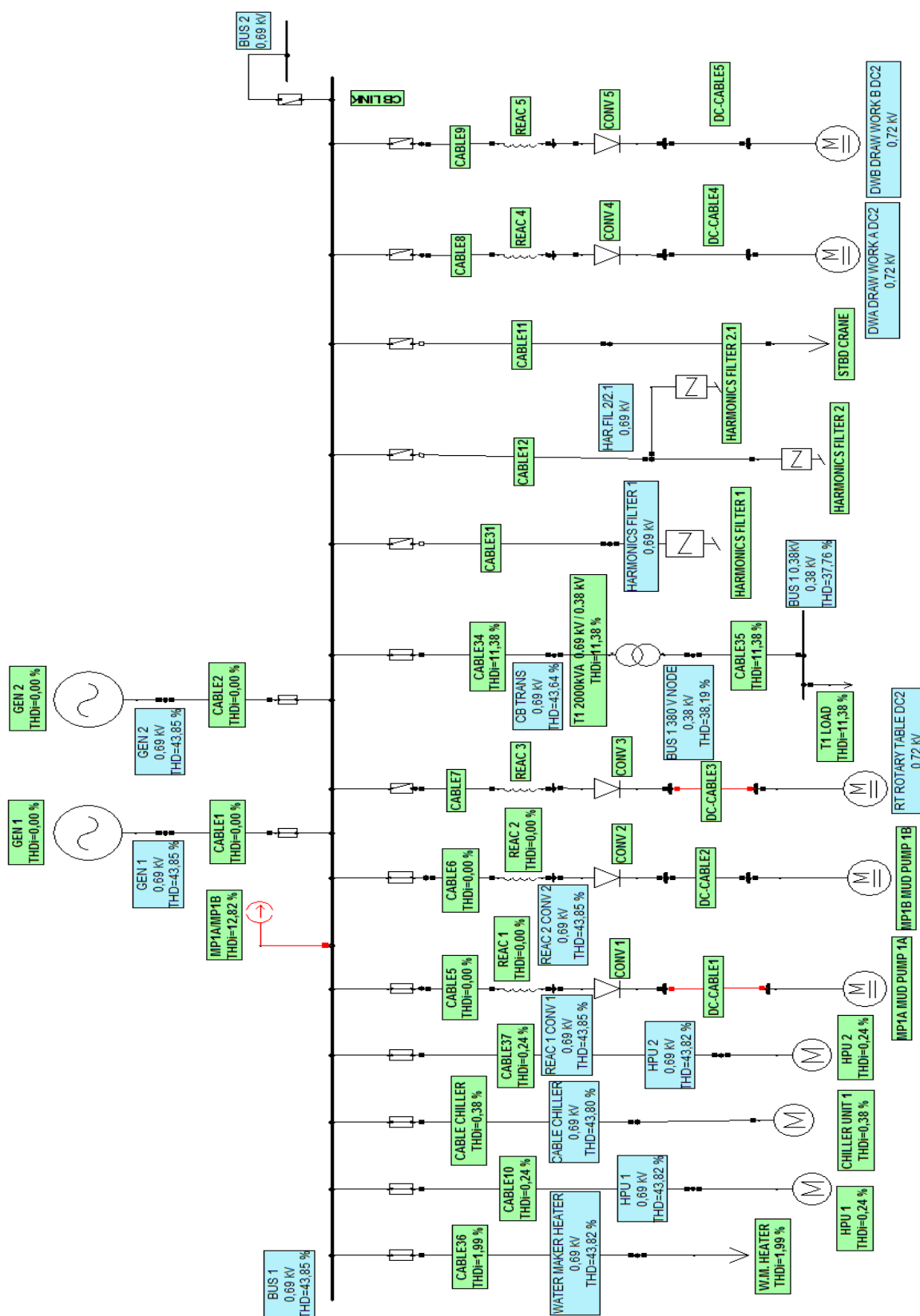
Kuorma	Tyyppi	THD <sub>i</sub> (%)	f (Hz)	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	U <sub>12</sub> (V)
CABLE5	Johto	0	250	0	0	0
			350	0	0	0
			550	0	0	0
			650	0	0	0
CABLE6	Johto	0	250	0	0	0
			350	0	0	0
			550	0	0	0
			650	0	0	0
CHILLER UNIT 1	Epätahtikone	0,38	250	9,872	0	237,585
			350	1,718	0	57,797
			550	2,989	0	157,84
			650	1,307	0	81,51
GEN 1	Tahtikone	0	0	0	0	0
GEN 2	Tahtikone	0	0	0	0	0
HPU 1	Epätahtikone	0,24	250	6,111	0	237,693
			350	1,064	0	57,824
			550	1,851	0	157,914
			650	0,8088	0	81,549
HPU 2	Epätahtikone	0,24	250	6,111	0	237,693
			350	1,064	0	57,824
			550	1,851	0	157,914
			650	0,8088	0	81,549
MP1A/MP1B	Virtalähde	12,82	250	329,28	0	237,867
			350	58,8	0	57,865
			550	105,84	0	158,025
			650	47,04	0	81,606
T1 LOAD	Kuorma	11,38	250	532,406	0	113,184
			350	94,395	0	27,383
			550	166,18	0	74,509
			650	72,799	0	38,449

## LIITE 6: KOKONAIJSÄNNITESÄRÖN TULOKSET ILMAN YLI-AALTOSUODATTIMIA

Solmupiste	THD (%)	f (Hz)	U (V)	u (%)
BUS 1	43,85	250	237,723	34,45
		350	57,846	8,38
		550	158,004	22,9
		650	81,598	11,83
BUS 1 0,38kV	37,76	250	113,184	29,79
		350	27,383	7,21
		550	74,509	19,61
		650	38,449	10,12
BUS 1 380 V NODE	38,19	250	114,44	30,12
		350	27,693	7,29
		550	75,364	19,83
		650	38,891	10,23
CABLE CHILLER	43,8	250	237,585	34,43
		350	57,797	8,38
		550	157,84	22,88
		650	81,51	11,81
CB MUD PUMP 1A	43,85	250	237,867	34,47
		350	57,865	8,39
		550	158,025	22,9
		650	81,606	11,83
CB MUD PUMP 1B	43,85	250	237,867	34,47
		350	57,865	8,39
		550	158,025	22,9
		650	81,606	11,83
CB TRANS	43,64	250	236,653	34,3
		350	57,584	8,35
		550	157,287	22,8
		650	81,228	11,77
GEN 1	43,85	250	237,867	34,47
		350	57,865	8,39
		550	158,025	22,9
		650	81,606	11,83
GEN 2	43,85	250	237,867	34,47
		350	57,865	8,39
		550	158,025	22,9
		650	81,606	11,83

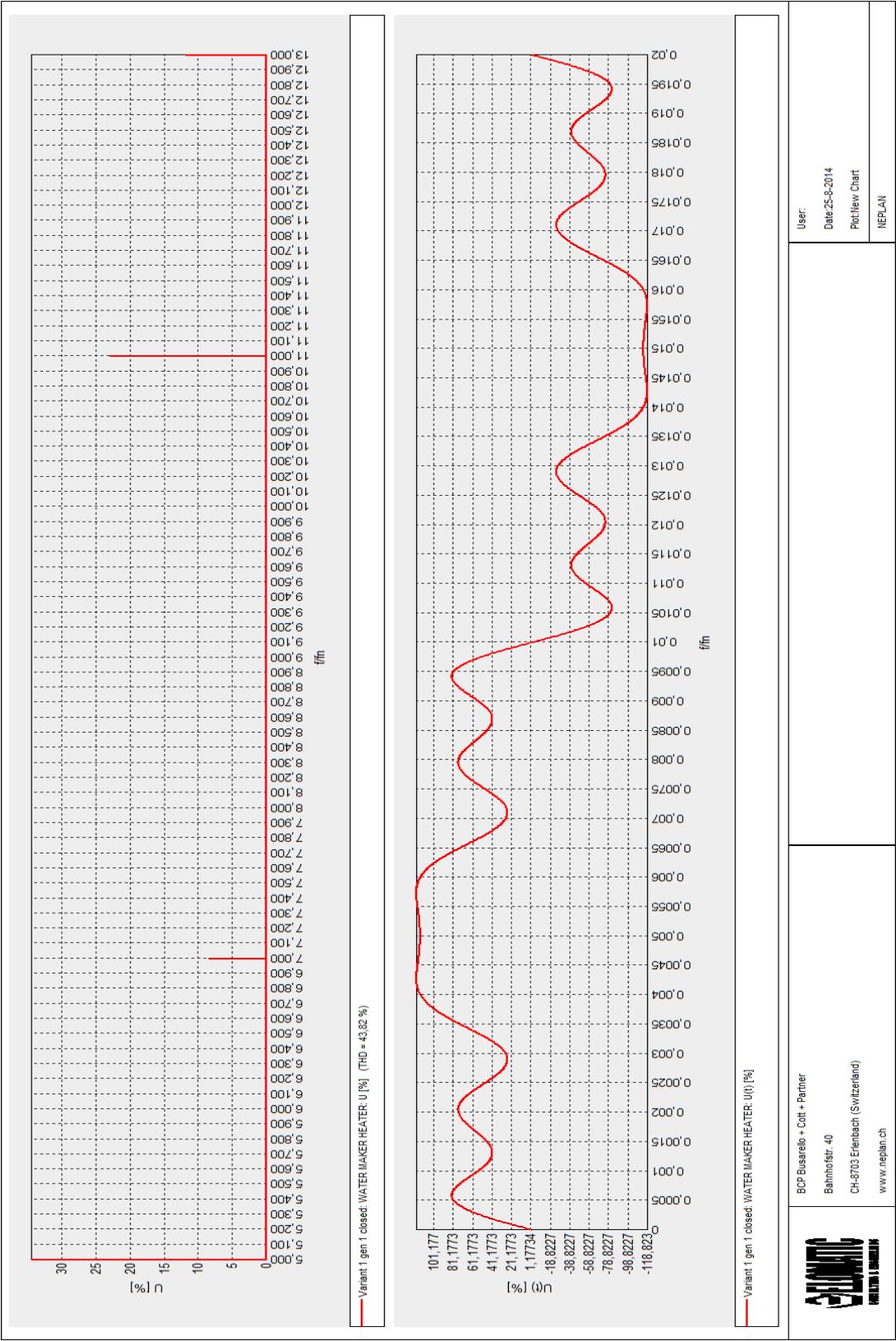
Solmupiste	THD (%)	f (Hz)	U (V)	u (%)
HPU 1	43,82	250	237,693	34,45
		350	57,824	8,38
		550	157,914	22,89
		650	81,549	11,82
HPU 2	43,82	250	237,693	34,45
		350	57,824	8,38
		550	157,914	22,89
		650	81,549	11,82
REAC 1 CONV 1	43,85	250	237,867	34,47
		350	57,865	8,39
		550	158,025	22,9
		650	81,606	11,83
REAC 2 CONV 2	43,85	250	237,867	34,47
		350	57,865	8,39
		550	158,025	22,9
		650	81,606	11,83
WATER MAKER HEATER	43,82	250	237,712	34,45
		350	57,827	8,38
		550	157,921	22,89
		650	81,552	11,82

## LIITE 7: YLIAALTOANALYYSIN TULOKSET ILMAN YLIAAL- TOSUODATTIMIA VERKKOMALLINÄKYMÄSSÄ





LIITE 8: W.M. HEATER- KOMPONENTIN JÄNNITTEEN KUVAAJA JA PALKKIKUVAAJA YLIAALLOISTA ILMAN YLIAALTOSUODATTIMIA



## LIITE 9: KOKONAISVIRTASÄRÖN TULOKSET YLIAAL-TOSUODATTIMILLA

Kuorma	Tyyppi	THD <sub>i</sub> (%)	f (Hz)	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	U <sub>12</sub> (V)
CABLE CHILLER	Johto	0,02	250	0,5049	0,5049	0,0143
			350	0,0998	0,0998	0,0039
			550	0,3266	0,3266	0,0202
			650	0,1574	0,1574	0,0115
T1 2000kVA 0.69 kV / 0.38 kV	Muuntaja	0,68	250	14,996	27,23	6,251
			350	3,018	5,481	1,735
			550	9,999	18,157	8,951
			650	4,83	8,771	5,101
W.M. HEATER	Kuorma	0,15	250	2,211	0	12,158
			350	0,6107	0	3,357
			550	3,139	0	17,255
			650	1,787	0	9,825
CABLE1	Johto	0	250	0	0	0
			350	0	0	0
			550	0	0	0
			650	0	0	0
CABLE10	Johto	0,01	250	0,3126	0,3126	0,0089
			350	0,0618	0,0618	0,0024
			550	0,2022	0,2022	0,0121
			650	0,0974	0,0974	0,0069
CABLE12	Johto	2,56	250	20,54	20,54	0,0102
			350	40,552	40,552	0,4013
			550	49,77	49,77	1,537
			650	21,288	21,288	0,7768
CABLE2	Johto	0	250	0	0	0
			350	0	0	0
			550	0	0	0
			650	0	0	0
CABLE31	Johto	11,03	250	299,927	299,927	2,567
			350	20,273	20,273	0,4006
			550	44,949	44,949	1,39
			650	20,374	20,374	0,7438
CABLE34	Johto	0,68	250	14,996	14,996	0,0548
			350	3,018	3,018	0,0152
			550	9,999	9,999	0,0783
			650	4,83	4,83	0,0446

Kuorma	Tyyppi	THD <sub>i</sub> (%)	f (Hz)	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)	U <sub>12</sub> (V)
CABLE35	Johto	0,68	250	27,23	27,23	0,0642
			350	5,481	5,481	0,018
			550	18,157	18,157	0,0934
			650	8,771	8,771	0,0533
CABLE36	Johto	0,15	250	2,211	2,211	0,0041
			350	0,6107	0,6107	0,0011
			550	3,139	3,139	0,0059
			650	1,787	1,787	0,0034
CABLE37	Johto	0,01	250	0,3126	0,3126	0,0089
			350	0,0618	0,0618	0,0024
			550	0,2022	0,2022	0,0121
			650	0,0974	0,0974	0,0069
CABLE5	Johto	0	250	0	0	0
			350	0	0	0
			550	0	0	0
			650	0	0	0
CABLE6	Johto	0	250	0	0	0
			350	0	0	0
			550	0	0	0
			650	0	0	0
CHILLER UNIT 1	Epätahtikone	0,02	250	0,5049	0	12,151
			350	0,0998	0	3,356
			550	0,3266	0	17,246
			650	0,1574	0	9,82
HPU 1	Epätahtikone	0,01	250	0,3126	0	12,157
			350	0,0618	0	3,357
			550	0,2022	0	17,254
			650	0,0974	0	9,825
HPU 2	Epätahtikone	0,01	250	0,3126	0	12,157
			350	0,0618	0	3,357
			550	0,2022	0	17,254
			650	0,0974	0	9,825
MP1A/MP1B	Virtalähde	12,82	250	329,28	0	12,166
			350	58,8	0	3,36
			550	105,84	0	17,266
			650	47,04	0	9,832
T1 LOAD	Kuorma	0,68	250	27,23	0	5,789
			350	5,481	0	1,59
			550	18,157	0	8,141
			650	8,771	0	4,632

## LIITE 10: KOKONAISJÄNNITESÄRÖN TULOKSET YLIAAL-TOSUODATTIMILLA

Solmupiste	THD (%)	f (Hz)	U (V)	u (%)
BUS 1	3,41	250	12,13	1,76
		350	3,298	0,48
		550	17,253	2,5
		650	9,828	1,42
BUS 1 0,38kV	2,93	250	5,789	1,52
		350	1,59	0,42
		550	8,141	2,14
		650	4,632	1,22
BUS 1 380 V NODE	2,96	250	5,853	1,54
		350	1,608	0,42
		550	8,234	2,17
		650	4,686	1,23
CABLE CHILLER	3,41	250	12,151	1,76
		350	3,356	0,49
		550	17,246	2,5
		650	9,82	1,42
CB MUD PUMP 1A	3,41	250	12,166	1,76
		350	3,36	0,49
		550	17,266	2,5
		650	9,832	1,42
CB MUD PUMP 1B	3,41	250	12,166	1,76
		350	3,36	0,49
		550	17,266	2,5
		650	9,832	1,42
CB TRANS	3,4	250	12,104	1,75
		350	3,343	0,48
		550	17,185	2,49
		650	9,786	1,42
GEN 1	3,41	250	12,166	1,76
		350	3,36	0,49
		550	17,266	2,5
		650	9,832	1,42
GEN 2	3,41	250	12,166	1,76
		350	3,36	0,49
		550	17,266	2,5
		650	9,832	1,42

Solmupiste	THD (%)	f (Hz)	U (V)	u (%)
HARMONICS FILTER 1	3	250	9,167	1,33
		350	2,952	0,43
		550	15,869	2,3
		650	9,085	1,32
HAR.FIL 2/2.1	3,19	250	12,12	1,76
		350	2,896	0,42
		550	15,717	2,28
		650	9,051	1,31
HPU 1	3,41	250	12,157	1,76
		350	3,357	0,49
		550	17,254	2,5
		650	9,825	1,42
HPU 2	3,41	250	12,157	1,76
		350	3,357	0,49
		550	17,254	2,5
		650	9,825	1,42
REAC 1 CONV 1	3,41	250	12,166	1,76
		350	3,36	0,49
		550	17,266	2,5
		650	9,832	1,42
REAC 2 CONV 2	3,41	250	12,166	1,76
		350	3,36	0,49
		550	17,266	2,5
		650	9,832	1,42
WATER MAKER HEATER	3,41	250	12,158	1,76
		350	3,357	0,49
		550	17,255	2,5
		650	9,825	1,42



LIITE 12: W.M. HEATER- KOMPONENTIN JÄNNITTEEN KUVAAJA JA PALKKIKUVAAJA YLIAALLOISTA YLIAALTOSUODATTIMILLA

